

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

І. В. Коц, О. П. Колісник

**ТЕПЛОВОЛОГІСНА ОБРОБКА БЕТОННИХ ВИРОБІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ АЕРОДИНАМІЧНОГО
НАГРІВАННЯ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 666.97.035.56:621.186.1

К 75

ББК 38.626.3

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 3 від 25 жовтня 2012 р.)

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор Гамеляк І. П.

доктор технічних наук, професор Дудар І. Н.

Коц, І. В.

К 75 Тепловологісна обробка бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівання : монографія / І. В. Коц, О. П. Колісник. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 114 с.

ISBN 978-966-641-509

В монографії розглянуто питання ресурсозбереження під час тепловологісної обробки бетонних виробів в пропарювальних камерах з використанням аеродинамічного нагріву. Наведено огляд основних способів та обладнання для тепловологісної обробки бетонних виробів. Запропоновано нові конструктивні рішення обладнання для здійснення технологічного процесу тепловологісної обробки. Отримані математичні моделі процесу тепломасообміну під час тепловологісної обробки з використанням аеродинамічного нагріву. Наведені аналітичні залежності, які можна застосовувати при виконанні проектних розрахунків параметрів конструкцій аналогічного обладнання та при виборі раціональних режимів їх функціонування.

© І. Коц, О. Колісник, 2013

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	7
1.1 Сучасний стан технології та дослідження в галузі тепловологісної обробки бетонних виробів	7
1.1.1 Способи для прискорення твердіння бетонних виробів	7
1.1.2 Обладнання для тепловологісної обробки (ТВО) бетонних виробів	8
1.1.3 Гідратація цементу в бетонних виробках	14
1.1.4 Режимми тепловологісної обробки	21
1.1.5 Тепломасообмінні процеси тепловологісної обробки	29
1.2 Аналіз конструктивних рішень теплогенераторів аеродинамічного типу	36
2 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ	44
2.1 Обґрунтування генерації теплової енергії в установках із аеродинамічним нагрівачем роторного типу	44
2.1.1 Аналіз балансу енергії при генерації тепла в робочому колесі	44
2.1.2 Фізична природа генерації тепла в робочому колесі	49
2.2 Принципові та конструктивні схеми виконання обладнання для тепловологісної обробки	52
2.2.1 Пропарювальна камера із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з вертикальним розподіленням пароповітряного середовища	53
2.2.2 Пропарювальна камера із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з горизонтальним розподіленням пароповітряного середовища	56
2.2.3 Автоклавна установка тепловологісної обробки	58
2.3 Вибір об'єкту дослідження	61
3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ В ПРОПАРЮВАЛЬНІЙ КАМЕРІ	63
3.1 Основні обмеження і припущення математичної моделі процесу тепловологісної обробки	63

3.2	Математичне моделювання процесів, що відбуваються у виробках	66
3.2.1	Математична модель процесів тепломасообміну у виробках	66
3.2.2	Математична модель гідратації цементу	71
3.3	Матеріальний баланс пароповітряного середовища пропарювальної камери	79
3.4	Енергетичний баланс пароповітряного середовища пропарювальної камери	81
3.5	Ексергетичний баланс пароповітряного середовища пропарювальної камери	83
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ	87
4.1	Методика і програма досліджень	87
4.2	Експериментальні стенди, обладнання та апаратура	90
4.3	Характеристика використовуваних матеріалів	96
4.4	Планування багатофакторного експерименту та параметрична оптимізація значень величин міцності бетону	98
	ВИСНОВКИ	106
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	107

ВСТУП

При виготовленні будівельних виробів теплова обробка є одним з найбільш енергоємних етапів, при якій споживається близько 60% від загальної кількості енерговитрат. Теоретично на нагрів виробу із бетону і металоформ необхідно всього лише 10-15% теплової енергії, а решта, що витрачається за відомими технологіями, – заплановані і незаплановані втрати, які досягають майже 50% від загальної кількості енерговитрат. Сучасний стан устаткування підприємств з виготовлення будівельних виробів, зокрема із бетону, потребує проведення подальшої реконструкції і модернізації виробництва з метою збільшення асортименту та якості, а також зниження собівартості продукції в умовах сучасного ринку. При цьому енергетична ефективність нових технологій та ефективна система управління процесом повинні бути одними з головних критеріїв їх вибору.

Енергетична ефективність є одним із основних критеріїв технології виробництва будівельних виробів разом з такими показниками, як собівартість, трудомісткість, матеріаломісткість, а також питомі капіталовкладення. Саме тому останнім часом використовують домішки, які прискорюють твердіння будівельних виробів. Використання даних домішок дозволяє виготовляти будівельні вироби без тепловологісної обробки, але залишається ряд будівельних виробів, які потребують обробки при підвищених температурі і тиску. Твердіння бетонних і залізобетонних виробів на заводах при звичайній температурі (15 ... 20 °C) є нераціональним, оскільки час твердіння бетону досить тривалий (тривалість твердіння бетону становить близько 28 діб). Це зменшує оборотність форм, відповідно збільшує металоємність виробництва за рахунок збільшення парку форм, затримує випуск готової продукції.

Російський вчений К.Д. Хрущев в кінці XIX, вперше, запропонував технологію виготовлення автоклавних матеріалів при достатньо високій температурі пари і при досить високому тиску. В результаті проведених досліджень відомих вітчизняних та зарубіжних публікацій було з'ясовано, що в наш час тепловологісна обробка будівельних матеріалів здійснюється в установках, які мають різні конструктивні особливості. Конструктивне виконання розглянутих

установок потребує великих витрат на влаштування допоміжного обладнання (котельні і комунікації). Зважаючи на великі витрати на влаштування допоміжного обладнання доцільно замінити котельню і комунікації на джерело пароутворення безпосередньо в установці.

Готовність бетонних виробів, їх якість та собівартість продукції залежать головним чином від технології виконання процесу тепловологісної обробки. Альтернативою розглянутим технологіям може стати застосування новітньої технології аеродинамічного нагріву. Згідно запропонованої технології основний теплогенеруючий пристрій – аеродинамічний нагрівач роторного типу (АНРТ) здійснює безперервну рециркуляцію повітряного потоку. При русі якого, внаслідок аеродинамічних втрат, відбувається постійний нагрів повітряного середовища у замкненому просторі теплоізовованої робочої камери. Нагрівальні установки з АНРТ не потребують рідкого або газоподібного палива та високовартісних електричних нагрівачів. Металеві частини конструкції установки нагріваються рівномірно по всьому об'єму робочої камери. Передача тепла відбувається за рахунок конвективного теплообміну, що забезпечує рівномірність нагріву. В таких установках відсутня небезпека враження електричним струмом обслуговуючого персоналу або вибуху. Установки можливо повністю автоматизувати.

Таким чином, **актуальність даної наукової роботи** полягає у подальшому розвитку, вдосконаленню і підвищенню ефективності технології та устаткування, що призначені для виготовлення бетонних виробів.

Метою даної роботи є розробка варіантів конструктивного виконання і вибір оптимальної конструктивної схеми устаткування та технології виготовлення бетонних виробів з заданими показниками міцності, довговічності та щільності шляхом узгодженого впливу температури і вологи на процеси структуроутворення бетонних будівельних виробів в установках для тепловологісної обробки із аеродинамічним нагрівом.

Наукова робота виконана в НДІ гідродинаміки ВНТУ та на кафедрі ТГП Вінницького національного технічного університету.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Сучасний стан технології та дослідження в галузі тепловологісної обробки бетонних виробів

1.1.1 Способи для прискорення твердіння бетонних виробів

Тепловологісна обробка є завершальною технологічною операцією направленою на прискорення твердіння бетонних виробів і набуття необхідних властивостей. На основні властивості бетону великий вплив роблять фізико-хімічні і структуроутворюючі процеси. Зміна пористої структури дисперсних тіл, форм і видів зв'язку, поглиненої ними води безпосередньо залежить від кінетики і динаміки тепломасообмінних процесів, що протікають при тепловій обробці колоїдних капілярно-пористих тіл. Остаточні технологічні властивості матеріалу в процесі тепловологісної обробки залежать від форми і виду зв'язку води з речовиною і від механізму перенесення води і теплоти. Процес тепловологісної обробки бетонних виробів є процесом тепломасообміну в системі дисперсного середовища при наявності фазових і хімічних перетворень. Кінцевий результат різних дій на тверднучу бетонну суміш залежить від моменту їх застосування, інтенсивності і тривалості, визначається узгодженістю прикладеної дії з фізико-хімічними процесами, що протікають в цементному тісті і процесами структуроутворення бетону.

Останніми роками розроблено і впроваджено цілий ряд новітнього устаткування для теплової обробки бетонних виробів. Для прискорення твердіння бетону використовують різні способи, а саме [1, 2, 3, 4, 83, 52, 53]: механічні; хімічні; теплові.

Механічні способи прискорення твердіння передбачають збільшення витрати цементу, використання швидкотверднучих цементів високих марок, зниження відношення В/Ц, застосування спеціальних способів укладання та ущільнення сумішей (пресування, вакуумування тощо). Але ці заходи пов'язані з ускладненням процесу виробництва.

Хімічні способи прискорення твердіння засновані на введенні в суміш хімічних добавок.

Теплові способи прискорення твердіння бетонних виробів в наш час найбільш ефективними і універсальними, а тому широко застосовуються при виробництві збірних залізобетонних виробів і конструкцій. До таких способів відносять: пропарювання при атмосферному тиску і підвищених температурі та вологості навколишнього середовища; запарювання при підвищених температурі, тиску і вологості в автоклавах; контактний обігрів, електротермообробка (електропрогрівання, електрообігрів, індукційне нагрівання), попереднє розігрівання бетонної суміші. Перші два способи дають можливість зберегти вологу в бетоні, необхідну для хімічних реакцій гідратації цементу, а тому теплову обробку бетону з умовою збереження вологи в матеріалі називають тепловологісною обробкою.

Найбільшого поширення на заводах набув тепловий спосіб прискорення твердіння бетону, а також комбінований, який поєднує в собі механічний, хімічний і тепловий способи.

Суть тепловологісного способу обробки бетонних виробів полягає в тому, що при підвищених відносній вологості навколишнього середовища (більше 95%) і температурі 60 - 100°C і більше швидкість реакції гідратації цементу збільшується (у 10 - 20 разів), процес твердіння бетону прискорюється, і вироби в коротший термін набувають міцність, необхідну для їх розформування, транспортування і монтажу.

1.1.2 Обладнання для тепловологісної обробки (ТВО) бетонних виробів

Умови для прискореного твердіння бетону за рахунок збільшення його температури створюються в теплових установках [2, 5], які розрізняють за режимом дії, типом технологічних ліній та конструкцією (рис. 1.1). Безпосередньо теплову обробку бетонних виробів класифікують за способом теплової обробки, видом теплоносія та способом передачі теплоти (рис. 1.2).

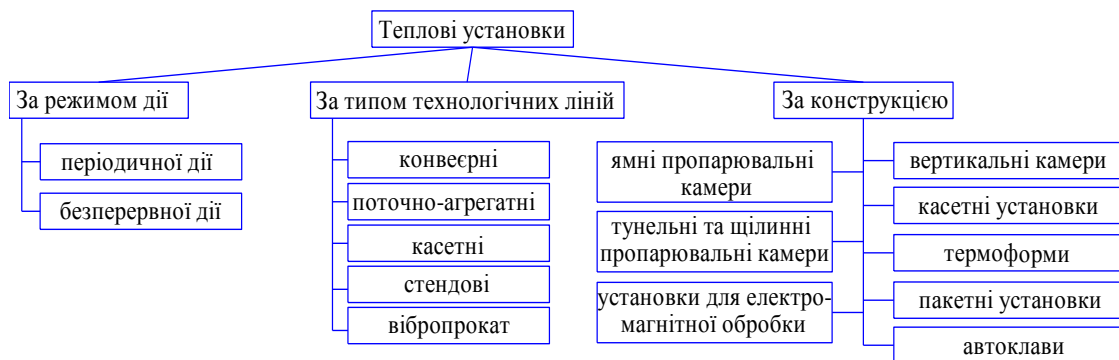


Рис. 1.1. Обладнання для теплової обробки бетонних виробів

У камери періодичної дії вироби завантажують краном і встановлюють в декілька рядів по висоті. Потім камеру закривають кришкою і подають насичену пару.

Камери безперервної дії є тунелем, в якому вироби у формах, встановлених на вагонетки, проходять послідовно зони підігріву, ізотермічної витримки і охолодження.

При стендовому способі вироби отримують в нерухомих формах (на стенді). Механізми (бетоноукладачі, вібратори тощо) по черзі підходять до стенду для виконання необхідних операцій. Цим способом виготовляють, як правило, великогабаритні вироби (ферми, колони, балки) на полігонах.

Касетний спосіб — варіант стендового способу, основою якого є формування виробів в стаціонарно встановлених касетах, що складаються з декількох вертикальних металевих форм-відсіків. У форму закладають арматурний каркас і заповнюють її бетонною сумішшю. Теплову обробку проводять контактним обігрівом через стінки форм. Після теплової обробки стінки форм розбирають і вироби виймають. Касетним способом виготовляють плоскі вироби (панелі перекриттів, стінові панелі тощо).

При поточно-агрегатному способі форми з виробами переміщуються від одного технологічного агрегату до іншого краном, а при конвеєрному вони стоять на вагонетках, які рухаються по рейкових напрямних.

При конвеєрному способі тепловологісну обробку здійснюють безперервним методом. Конвеєрний спосіб — високопродуктивний,

але на кожній нитці конвеєра можна випускати виріб тільки одного типорозміру.

При способі вібропрокату процеси отримання залізобетонного виробу відбуваються на одній установці безперервної дії – стані вібропрокату. Стан вібропрокату — це конвеєр із сталеної обгумованої формуючої стрічки, яка рухається уздовж постів укладання арматури і бетону, віброущільнення бетону і контактної теплової обробки. Способом вібропрокату отримують плити перекриттів, легкобетонні панелі зовнішніх стін тощо. Цей спосіб найпродуктивніший, але перехід з випуску одного виду виробів на інший складний, оскільки пов'язаний з повним переоснащенням стану [2, 5].

Теплова обробка бетонних виробів із бетону в апаратах безперервної дії має ряд істотних переваг в технологічному відношенні перед установками періодичної дії [6]. Зокрема, вона характеризується:

- безперервністю роботи установки і потоковою лінією виробництва залізобетонних виробів;
- вищою в порівнянні з періодичною продуктивністю апаратів;
- зменшенням тривалості теплової обробки і, у зв'язку з цим, поліпшенням якості виробів;
- раціональнішим використанням води і пари, ніж в апаратах періодичної дії.

Проте установки безперервної дії, у порівнянні з установками періодичної дії є менш універсальні, а тому майже не застосовуються в гнучких технологічних виробництвах. Універсалізація ж апаратів безперервної дії досягається або істотним ускладненням їх конструкції чи проведенням високовартісних і тривалих переналагоджень. Окрім того, до інших недоліків установок теплової обробки бетонних виробів безперервної дії можна також віднести їх високу вартість, складність в експлуатації та обслуговуванні, недостатню надійність складної і громіздкої кінематики приводних механізмів.

Таким чином, основним устаткуванням для теплової обробки бетонних виробів залишаються установки періодичної дії, які застосовуються на більшості підприємств будівельної промисловості.

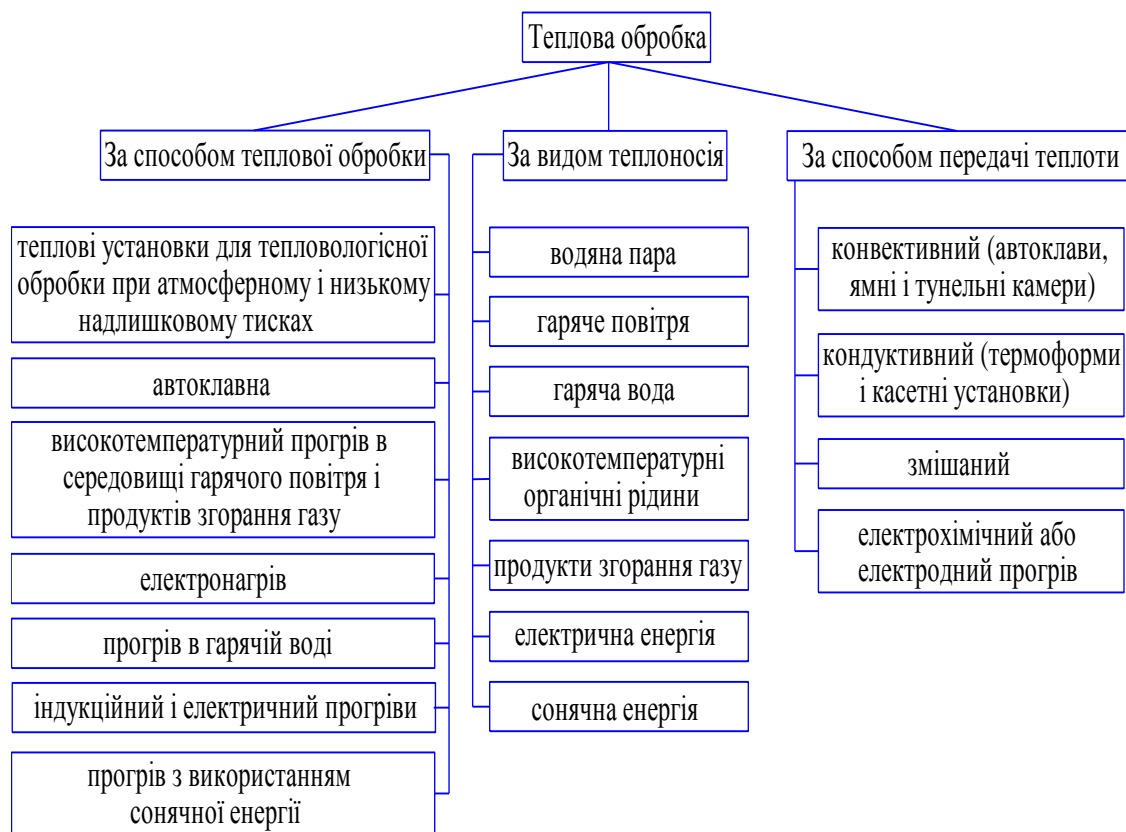


Рис. 1.2. Способи теплової обробки

У камерах періодичної дії водяна пара, як правило, змішується з повітрям, що знаходиться в камері, і обробка виробів здійснюється пароповітряною сумішшю, температура якої в безнапірних камерах завжди нижче 100°C . Оскільки гаряча пара легше за повітря і має більш високу температуру, вона накопичується у верхній частині камери, а нижче розташовується пароповітряна суміш з поступово зменшуваною концентрацією водяної пари. В зв'язку з цим, по висоті камери спостерігається перепад температур, який призводить до нерівномірного прогрівання бетонних виробів. Для усунення цього недоліку розроблені камери з інтенсивною примусовою циркуляцією теплоносія, що забезпечують високі показники теплообміну і рівномірний нагрів виробів.

Основні способи прискорення твердіння бетону, які дозволяють отримати необхідну міцність бетону за 2,5 – 14 годин – пропарювання в камерах при температурі до 100°C і атмосферному тиску та запарювання в автоклавах при температурі насиченої водяної пари $175 - 200^{\circ}\text{C}$ і тиску 0,8 – 1,3 МПа. Відмінна особливість цих способів

– інтенсивний теплообмін між тепловологісними середовищем і бетоном.

Пропарювальні камери ямного типу [6] застосовують як в закритих цехових приміщеннях, так і на відкритих майданчиках-полігонах. Вони мають істотні переваги:

- універсальність застосування і, у зв'язку з цим, можливість використання їх для теплової обробки великої номенклатури бетонних виробів, що виготовляються;

- низьку вартість і відносно незначні витрати на експлуатацію і обслуговування.

Крім того, використання в пропарювальних камерах пари, яка безпосередньо контактує з відкритою поверхнею виробів, запобігає випаровуванню води з матеріалу. Але з іншої сторони широко розповсюджені на заводах ямні камери з позицій енерговитрат є досить низько ефективними тепловими установками, оскільки їх ККД не перевищує 0,1–0,15, а оборотність в середньому складає 1–1,2 рази на добу. Велика кількість тепла втрачається при завантаженні і вивантаженні виробів із відкритої камери. Крім того, в даний час на багатьох заводах ще відсутнє автоматичне регулювання і контроль режимів ТВО.

З метою економного використання енергії при тепловій обробці слід переходити від ямних камер до ефективніших щілинних і вертикальних камер, використання заздалегідь розігрітих бетонних сумішей, прогрівання в касетних установках чи в пакетах термоформ тощо. Контактне прогрівання бетонних виробів в даних установках здійснюється шляхом контакту перегрітого теплоносія (гострою парою, перегрітою водою тощо) з формою, її окремими елементами або перегородками, при цьому виключається можливість вологообміну між тепловологісними середовищем і бетонним виробом. В середньому використання цих способів термообробки дозволить значно зменшити енерговитрати приблизно в 1,2 – 1,3 рази.

Теплові способи прискорення твердіння бетону вимагають додаткових паливно-енергетичних витрат. Одним із резервів економії тепла є також підвищення теплової ефективності ізоляції корпусу теплових установок. Сумарні тепловтрати через стіни і днище камер в процесі пропарювання і охолодження після відключення подачі пари і під час завантаження і розвантаження камер складають близько 70%

від загальної витрати тепла, внаслідок високої теплопровідності і теплоємності існуючих типових захисних конструкцій.

Автоклавну обробку бетонних виробів при підвищених температурах (175 -200°C) і тиску насиченої водяної пари (0,8 - 1,3 МПа) застосовують при виготовленні дрібнозернистих та чарункових бетонів. Підвищений тиск насиченої пари попереджує перехід води з рідкого в пароподібний стан, завдяки чому значно прискорюються процеси твердіння бетонних виробів та утворюються нові цементуючі сполуки (гідросилікати кальцію і магнію), що підвищують міцність бетону. Ця особливість зумовлює можливість заміни портландцементу місцевими в'язучими речовинами і застосування промислових відходів.

Іншою серйозною проблемою є створення і експлуатація великого парового господарства, питома вага якого в загальній кошторисній вартості підприємства складає 26 – 28%, а енергетична складова в собівартості продукції перевищує 21%, тоді як частка корисного використання енергії знаходиться в межах 0,12 – 0,34 [7].

Електротермообробка в автоклавних установках [7] забезпечує отримання готової продукції з необхідною вологістю, завдяки чому поліпшуються теплофізичні характеристики елементів захисних конструкцій. Недоліком такої обробки є те, що тепло, яке виділяється електричними нагрівачами нерівномірно прогріває весь простір автоклавної установки, а отже й вироби, які оброблюються, навіть при наявності вентилятора і теплових екранів. Конструкція нагрівальних елементів неспроможна забезпечити низькотемпературне нагрівання, а тому для забезпечення ефективності технологічного процесу необхідно розігрівати нагрівальні прилади до високої температури, в результаті чого, виникає суттєва різниця температур між нагрівальним елементом і виробом, який підлягає тепловій обробці. Через надлишок тепла у виробі виникає перегрів, що призводить до виникнення дефектів у ньому. Цей негативний фактор спричиняє погіршення властивостей оброблюваних виробів, а також може створювати пожежонебезпечну ситуацію.

1.1.3 Гідратація цементу в бетонних виробках

Огляд наявної в літературі інформації щодо впливу тепла, як технологічного чинника, на якість бетону, на швидкість набору його міцності і на величину енерговитрат показує, що якість бетону і швидкість його твердіння визначаються характером процесів, пов'язаних з перетворенням суміші на бетон.

Дослідженню процесів, що відбуваються в бетонній суміші і тверднучому бетоні під впливом підвищених температур, присвячені роботи А.С. Арбенєва, Ю.М. Баженова, В.С. Баталова, Ю.М. Бутта, В.П. Ганіна, П.Г. Комохова, Б.М. Красновського, Б.А. Крилова, Л.А. Малініної, С.А. Міронова, А.М. Невіля, Г.В. Клаусека і інших [3, 7, 8, 9, 10, 11].

У роботах даних вчених наведено, що теплова обробка бетону є найбільш поширеним і ефективним методом прискорення твердіння бетону. Підвищені температури твердіючого бетону впливають на кінетику структуроутворення, динаміку набору міцності, властивості отримуваних кристалічних структур. Дослідженнями І.В. Кравченко і М.Г. Власової було встановлене, що швидкість хімічних реакцій у твердіючому бетоні в порівнянні з нормальними умовами зростає в шість разів при температурі 30 °С і вдесятеро – при температурі 100 °С [12].

При цьому істотних відмінностей у складі продуктів гідратації не знайдено. Л.А. Малініна узагальнила результати досліджень в області тепловологісної обробки бетону та вважає, що немає суттєвої різниці між кінцевим фазовим складом новоутворень, що виникають при твердненні в нормальних умовах і при прогріванні. При цьому прогрівання не тільки не зменшує ступінь гідратації, але навіть дещо збільшує її [13].

З підвищенням температури прискорюється кінетика процесів, послідовність і повнота фазових перетворень, скорочується індукційний період твердіння. Незалежно від температури твердіння сумарне тепловиділення (екзотермічне тепло) пропорційне ступеню гідратації цементу [14].

Процес гідратації в'язучого і розвитку структури твердіння зводиться до розчинення у воді первинної твердої дисперсної фази твердої речовини з утворенням розчину, перенасиченого по

відношенню до кристалів гідратного новоутворення і до викристалізовування з цього розчину нової фази кристалічного гідрату з утворенням просторової структури твердіння, тобто штучного каменя. При цьому спочатку виникає каркас, а потім він обростає частинками гідрату [47].

Н. Штейн і Х. Стевенс [15] встановили, що відразу після розчинення водою на поверхні мінералу утворюється плівка високоосновного гідросилікату кальцію (C_3SH_k), який не видно навіть в електронний мікроскоп. Такий гідросилікат послідовно перетворюється спочатку на $CSH(B)$, а потім в (C_2SH_2) . Це підтвердили С. Брунауер і Д. Кантро, а також Дж. Калоузек [11], прийшовши до висновку про наявність трьох стадій гідратації.

Первинним продуктом гідратації основного мінералу клінкеру є гідрат, багатий вапном – (C_3SH_k), який потім переходить у менш основний гідросилікат $C-S-H$. Запропонований наступний механізм гідратації цього мінералу:

$C_3S + H \rightarrow C_3SH_k$ – первинний гідрат;

$C_3SH_k \rightarrow CH$ + від 0,8 до 1,5 CSH – вторинний гідрат;

від 0,8 до 1,5 $CSH + CH \rightarrow 1,5 - 2 CSH$ – третинний гідрат.

Первинний гідрат утворює непроникний для води протягом 2 – 6 год. прикордонний шар. Цей час відповідає індукційному періоду гідратації.

Вищезгадані вчені встановили, що залежно від V/C змінюється основність гідросилікату кальцію.

Великий внесок в рішення питання про склад продуктів і ступеня гідратації цементу, що твердне при підвищених температурах 50-100°C ТВО внесли Ю. М. Бутт, П. Л. Будников, Т. М. Берковіч, І. В. Кравченко, М. М. Маянц, Ю. С. Малінін, С. А. Міронов, В. І. Тімашев, Х. Тейлор, Дж. Калоузек, Р. Нерс і багато інших. Їм не вдалося виявити істотної різниці між складом продуктів гідратації, що утворюються при нормальному твердненні й при пропарюванні. Було встановлено, що швидкість хімічної реакції прискорюється лише у міру підвищення температури, при температурі до 80°C в 6 разів і при 100°C в 10 разів в порівнянні з швидкістю гідратації при 20°C.

За даними О.М. Астрєєвої [16] процес гідратації і виникнення структури може бути побудований за наступною схемою. При контакті з водою в'язка речовина розчиняється і утворюється

пересичений (по відношенню до гідрату) розчин. У пересиченому розчині виділяються зародки гідрату. Кристали гідрату, що ростуть, зближуються і з'єднуються, утворюючи камнеподібну структуру. Враховуючи це, процес твердіння розділяють на елементарні стадії: розчинення початкової речовини, утворення зародків нової фази (гідрату), зростання кристалів гідрату, утворення колоїдної і кристалізаційної структур.

За даними І. Н. Ахнердова [17], кінцеві фізико-технічні властивості цементного каменя обумовлюються коагуляційним структуроутворенням. Перша стадія процесу пов'язана із зменшенням кількості вільної води, збільшенням концентрації розчину електроліту до початку схоплювання з подальшим зменшенням її по експоненті. Одночасно відбувається інтенсивний процес перерозподілу води і скріплення її твердою фазою до тих пір, поки вона повністю не вступить в адсорбційний зв'язок. Перераховані процеси обумовлюють кінець формування коагуляційної структури цементного тіста.

Якраз з цієї миті починається процес кристалізаційне структуроутворення цементного каменя. Відбувається інтенсивне зменшення кількості вільних молекул в пересиченому розчині (гелі) через виникнення центрів кристалізації, обумовлюючих формування субмікрокристалічної структури навколо непрогідратованих зерен цементу. Одночасно з цим виникають зв'язки між кристалічними новоутвореннями, що веде до зростання їх інтегральної міцності з часом.

Таким чином, на думку вищезазначених вчених, вплив теплової обробки на фізико-хімічні процеси зводиться, в основному, до прискорення гідратації цементу. Проте, при цьому мінералогічний склад цементу має вплив на вибір режиму теплової обробки.

Міцність штучного каменя визначається не стільки міцністю окремих кристалів новоутворень, скільки міцністю і характером формуємого з них зростка, а також капілярно-пористою структурою каменя в цілому.

Тепловологісна обробка бетону в межах до 40 °С відноситься до м'яких режимів прогрівання. При температурі більше 50 °С характер набору міцності бетону на різних цементах стає диференційованим і тим більше, чим вище температура прогрівання. Прогрівання бетону на портландцементі при температурі 70-80°C може призвести до

зниження міцності до 20% по відношенню до зразків нормального твердіння. Змішані цементи, навпаки, дають приріст міцності з підвищенням температури теплової обробки. За даними С. А. Міронова відносна міцність бетону, витриманого 28 діб після пропарювання або електропрогрівання, по відношенню до зразків нормального твердіння складає 80-110% - для портландцементу та 110-130% - для шлакопортландцементу [18]. Пояснюється це тим, що тонкомолоті активні добавки, особливо доменний гранульований шлак, при підвищених температурах залучаються до процесу твердіння, забезпечуючи приріст міцності бетону.

Тепловологісна обробка бетону, не помітно впливає на зміну фазового складу новоутворень, ступінь і глибину гідратації цементу, а позначається на зміні капілярно-пористої структури бетону. Розглянемо це детальніше.

Згідно П. А. Ребіндера в оводнених капілярах спостерігаються наступні форми зв'язку води: хімічна; фізико-хімічна, в основному адсорбційна мономолекулярних шарів і волога з осмотичним зв'язком; фізико-механічна, що знаходиться в капілярах, адсорбційна полімолекулярних шарів, а також рідина змочування. На початку твердіння хімічно зв'язується не більше 1% води від ваги цементу (перші 2 години), отже, переважає вода з фізико-механічним зв'язком. З часом твердіння кількість хімічно зв'язаної води незначно зростає, але не перевищує на протязі 28 діб 18-22%. Надлишкова вода поступово випаровується, залишаючи за собою пори.

В свіжо укладеному бетоні завжди міститься газоподібна фаза, джерелами формування якої є: повітря, що залучається до бетонної суміші в процесі приготування, укладання і віброущільнення з розмірами бульбашок 0,005-0,2 см; повітря, адсорбційно зв'язане з поверхнями твердих частинок; повітря, розчинене у воді і перехідне у вільний стан під впливом вібрації і нагрівання. Наприклад, при нагріванні 1 л звичайної водопровідної води від 15 до 90 °С виділяється 10см³ повітря [23]. Крім того, в результаті реакції між дисперсним залізом, що міститься в цементі, і водою розчинення виділяються водень і інші гази.

Отже, на початку твердіння свіжий бетон містить 170-200 л/м³ води, 30-40 л/м³ газоподібної фази. Таким чином, пористість

складається з об'єму, зайнятого випаровуваною водою, і об'ємом газоподібної фази.

За даними А. К. Шейкіна [19] загальна пористість цементно-піщаних розчинів, підданих тепловій обробці, була в середньому на 8-15% більше по відношенню до зразків нормального твердіння. Дослідження Л. А. Малініної також вказують на збільшення загальної пористості прогрітого бетону на 10-13% [14].

На думку ряду вчених [2, 8, 11, 12] причинами порушення структури бетону, що твердне в умовах, підвищеної температури є:

- об'ємні зміни, викликані відмінністю теплових розширень компонентів бетону, головним чином води, пароповітряної фази і повітря, зокрема залученого в процесі приготування і укладання бетонної суміші, адсорбційного та виділеного з води при нагріванні;
- надмірний тиск пароповітряної фази, що виникає в порах бетону;
- міграція вологи;
- об'ємні зміни, пов'язані з внутрішнім і зовнішнім масообміном

Внаслідок деструктивних явищ, викликаних тепловою обробкою бетону, втрати його міцності складають 17-23%. Рядом технологічних прийомів (попередня витримка, м'які ступінчасті режими підйому температури) можна зменшити негативні наслідки деструктивних процесів, але повністю їх виключення неможливе.

Кардинальним вирішенням проблеми зниження негативною впливу підвищених температур на структуру бетону є метод попереднього розігрівання бетонної суміші, запропонований А. С. Арбеньєвим в 1962 році. Суть методу полягає в тому, що тепло вноситься не в твердіючий бетон, а в бетонну суміш до її укладання та ущільнення.

Метод попереднього розігрівання отримав подальший розвиток в працях Б. А. Крилова [20], П. Г. Комохова [9], В. С. Баталова [8], Б. М. Красновського та іншими вченими.

Все різноманіття методів попереднього розігрівання принципова не змінює його первинної сутності. При внесенні теплоти у суміш перед укладанням в форми об'ємні розширення її компонентів відбуваються, коли суміш знаходиться в пластичному стані. Ущільнення суміші при укладанні усуває наслідки теплових об'ємних розширень її компонентів, а наступне поступове охолодження бетону сприяє формуванню щільної структури. Змінюється характер

пористості, але порівняно з прогріванням бетону зменшується число капілярних пор і збільшується кількість замкнутих пор.

При попередньому розігріванні бетонна суміш акумулює теплову енергію, яка потім поступово витрачається на прискорення фізико-хімічних процесів твердіння цементного каменя і підтримку позитивної температури укладеного бетону.

Попереднє розігрівання здійснюється протягом 10-20 хвилин при порційному розігріванні і за 1-3 хвилини при безперервному режимі, скорочуючи загальний цикл теплової обробки бетону

Попереднє розігрівання бетонної суміші істотно впливає на інтенсивність протікання фізико-хімічні процеси в бетоні. Після розігрівання бетонної суміші активізуються реакції гідратації цементу, в тому числі швидкість тепловиділення цементу. Разом з розглянутими перевагами попереднього розігрівання йому властиві і деякі недоліки, особливо характерні для ранніх етапів його розвитку. Істотним недоліком методу є втрата рухливості розігрітої бетонної суміші. Із збільшенням температури розігрівання суміш швидше втрачає рухливість. При продовженні процесу розігрівання понад 5 хвилин втрата рухливості суміші також зростає. При порційному розігріванні має місце значне обростання електродів бетонною сумішшю і нерівномірність використання електричної потужності, великі значення необхідної потужності.

Величина енерговитрат на теплову обробку бетону залежить від багатьох чинників, основними з яких є вид енергоносія й спосіб його використання. Найбільше розповсюдження отримало пропарювання виробів і конструкцій. Завдяки великому числу досліджень і розробок вітчизняних і зарубіжних вчених і фахівців деякі підприємства мають достатньо хороші показники по енерговитратам на пропарювання (до $0,2 - 0,3 \text{ Гкал/м}^3$). Проте, в цілому метод пропарювання дуже енергоємний – в середньому $0,5 \text{ Гкал/м}^3$ або 580 кВт-год/м^3 . Пояснюється це наступними причинами. Баланс енерговитрат складається з наступних: 10 – 20% тепла втрачається при виробленні пари; 10 – 15% – при транспортуванні пари; 5 – 10% – на розширення при виході пари з паропроводів в камери. У пропарювальних камерах залишається не більше 50% тепла палива, що спалюється в топках. З врахуванням низького ККД камер (близько 40%) загальний ККД не

може перевищувати 25-28%. Насправді ККД пропарювання становить 10-12% [6].

Виходячи з вище сказаного, можна сформулювати наступні висновки:

1. Застосування тепла, як засіб прискорення твердіння бетону, є найбільш поширеним при виробництві збірних і при зведенні монолітних конструкцій. Стосовно будівельних умов термообробка бетону розглядається ще і як один з основних методів зимового бетонування.

2. Фазовий склад моноутворень, що є продуктами гідратації цементу, що твердне в різних умовах витримки, в тому числі при різних температурах, залишається практично однаковим.

3. Внесення тепла до твердіючого бетону, незалежно від того, яким способом воно здійснюється, має недолік, викликаний деструктивними процесами, які відбуваються в твердіючому бетоні при накладанні на нього температурного поля. Пояснюється це істотною різницею об'ємних температурних деформацій компонентів бетону.

4. Вирішенню завдань інтенсифікації бетонних робіт в більшій мірі задовольняє попереднє розігрівання бетонної суміші. Це зумовлюється наступними обставинами:

- внесення тепла до бетонної суміші до її укладання і ущільнення зводить до мінімуму негативні впливи деструктивних процесів;

- відповідно до принципу Ле-Шательє при поступовому охолодженні бетону, приготованого з розігрітої суміші, відбувається глибша гідратація цементу;

- метод найбільш економічний, оскільки: електрична енергія перетворюється теплову безпосередньо в бетонній суміші в момент її максимальної електропровідності; ефективно використовується екзотермія цементу, максимум якої досягається через 1,5– 2 години після розігрівання суміші, виключається безповоротна втрата гріючих дротів, електродів та інших допоміжних матеріалів;

- легше, ніж при інших способах термообробки бетону, керувати процесами його структуроутворення;

- вища надійність методу і менша трудомісткість в порівнянні із способами, заснованими на внесенні тепла до твердіючого бетону. На

твердіючий бетон з розігрітої суміші менше впливають непередбачені виробничі і інші випадкові чинники.

Для усунення недоліків попереднього розігрівання, яке здійснюється в порційному режимі (небезпека втрати рухливості бетонної суміші, обростання електродів тощо) і для посилення його переваг доцільно розігрів суміші здійснювати в безперервному режимі і поєднувати його з іншими технологічними операціями, зокрема з вібраційною обробкою суміші.

1.1.4 Режими тепловологісної обробки

Весь цикл ТВО в пропарювальних камерах ділять на чотири періоди: попередня витримка, підігрів до максимальної температури, ізотермічна витримка і охолодження. Тривалість ТВО визначається необхідною міцністю виробів, їх товщиною, витратою цементу і його активністю, мінімальними приведеними витратами тощо. Вона виражається сумою окремих його періодів в годинах.

Період попередньої витримки звичайно складає 1 – 5 год. Швидкість підйому температури в другий період не повинна перевищувати 60°C/год, тривалість цього періоду становить 2 – 3,5 год. Оптимальна температура ізотермічної витримки для бетонів на портландцементі 80 – 85°C, на шлакопортландцементі і пуцоланових портландцементів 90 – 95°C, тривалість ізотермічної витримки 2 – 13 год. Період охолодження бетонних виробів в камерах становить 0,5 – 2,5 години.

Тривалість окремих етапів, залежно від складу бетонної суміші, може бути різною. Так, наприклад, час попередньої витримки може складати від декількох хвилин до декількох годин і навіть доби; час підйому температури, витримки і охолодження також може коливатися у великих межах (при вібропрокаті час підйому температури до 100°C складає всього декілька хвилин, разом з тим, при інших технологічних схемах виробництва цей період триває декілька годин). Тому необхідно визначити роль того або іншого періоду в загальному циклі теплової обробки і його вплив на процеси структуроутворення бетону.

1. Попередня витримка до пропарювання.

На міцність готового бетонного виробу негативно діє передчасне підвищення температури навіть в умовах, що виключають можливість випаровування вологи. Оптимальний час попередньої витримки бетону перед тепловою обробкою, на думку А. Е. Шейкіна [19, 21], залежить від декількох чинників і він зменшується зі зменшенням помолу цементу.

С. А. Міронов [18, 22] вважав, що попередня витримка не тільки підвищує міцність бетону, але й забезпечує отримання стійкіших показників міцності. Максимального ефекту можна досягти попередньою витримкою перед пропарюванням рухомих бетонних сумішей. Вона також доцільна і перед пропарюванням жорстких сумішей, оскільки не залежить від жорсткості бетонної суміші, що сприяє інтенсивнішому зростанню міцності при подальшому твердненні.

У дослідженнях Л. А. Малініної та С. А. Міронова [3, 13, 14, 18, 22] оптимальним часом попередньої витримки вважається початок тужавлення бетону. Він, у свою чергу, залежить не тільки від складу цементу і бетону, але й від температури навколишнього середовища. Чим вище В/Ц і рухливість бетонної суміші і нижче температура середовища, тим довше триває попередня витримка виробів до пропарювання. Залежно від цих чинників час попередньої витримки бетонів на портландцементі може варіюватися від 2 до 10 годин.

У зв'язку з відсутністю спеціально запланованої попередньої витримки при організації заводського виробництва, особливо при пропарюванні виробів з негайною розпалубкою, можливе отримання виробу із зниженою міцністю, як одразу після теплової обробки, так і при подальшому твердненні. Тому бетон не досягає нормативної міцності у віці 28 діб в порівнянні з бетоном нормального твердіння.

Таким чином, в період попередньої витримки складається певна структура бетону, яка формується в порівняно спокійних умовах (за відсутності інтенсивної міграції вологи, температурних деформацій складових матеріалів бетону тощо). Ця структура стає здатною сприймати теплову дію при підйомі температури без істотної зміни. За даними Л.А. Малініної [13] оптимальним часом попередньої витримки бетону слід вважати період, за який бетон набуває міцності порядку 0,3 – 0,5МПа.

2. Підвищення температури в камері пропарювання.

Нагрівання виробів при вході в пропарювальну камеру відбувається за рахунок теплопровідності матеріалу, конвекції від пароповітряного середовища і конденсації пари. Вода, що утворюється при конденсації пари, у вигляді крапель осідає на поверхню виробу. Цей процес, відбувається до тих пір поки не буде досягнута рівновага температур середовища в пропарювальній камері і виробі. Оскільки на другому етапі і на початку третього виріб має нижчу температуру, ніж середовище, то й тиск пари в камері перевищує тиск пари у виробі. Внаслідок цього виріб поглинає деяку кількість води, що утворилася на його поверхні.

В результаті температурного розширення під час ТВО бетон збільшується в об'ємі. Він є конгломератом, що складається з різних матеріалів: цементу, води, крупного і дрібного заповнювачів, що мають свій коефіцієнт температурного розширення. Зі всіх компонентів бетону вода має найбільший коефіцієнт температурного розширення, що розширюється в сотні разів більше, ніж твердий скелет. У бетоні також зазвичай міститься 2 – 4% повітря, залученого в процесі його приготування й укладання.

Якщо б бетон був механічною сумішшю не зв'язаних між собою матеріалів, то величина розширення при нагріванні дорівнювала б сумі добутків об'єму кожного матеріалу на його коефіцієнт температурного розширення, а при охолодженні об'єм суміші повертався б до початкової величини. Проте після пропарювання бетони мають схильність до залишкового розширення, оскільки при ТВО в бетоні відбуваються складні фізико-хімічні процеси твердіння, в результаті яких утворюється штучний камінь. При швидкому розігріванні свіжовідформованого бетону фізичний процес температурного розширення випереджатиме хімічний процес твердіння [9], а при повільному підйомі температури складаються сприятливіші умови для формування структури: бетон встигає набрати певну міцність до досягнення ним значного температурного розширення [10, 20].

У твердіючому бетоні міграція вологи сприяє утворенню пористості, а також виникненню внутрішніх надлишкових тисків. Мігруючи в бетоні між глибинними і поверхневими шарами рідина і повітря сполучають між собою пори і порожнечі, збільшують ефективний радіус капілярів, руйнують зв'язки, що ще не зміцніли, в

місцях контакту кристалічних зростків, що зрощуються, створюють направлену (перпендикулярно до поверхні виробів) пористість. Згідно результатів досліджень А. Е. Шейкіна [19, 21], ТВО знижує щільність цементного каменя в порівнянні з нормально-вологим твердінням, а за даними Л. А. Малініної [18] пропарювання збільшує проникність бетону в 3 – 4 рази порівняно з нормально-вологим твердінням. І. Н. Ахнердовим [17] було показано, що мінімальна пористість для портландцементу досягається після 6-годинного пропарювання, а для пуццоланового портландцементу - після 8-годинного пропарювання при 95 °С.

Слід особливо відзначити негативну роль повітря в бетоні при формуванні його структури під час теплової обробки. Пори в середині бетону внаслідок розширення в них повітря прагнуть розсунути частинки бетону і зайняти більший об'єм. Проте це можливо, лише якщо бетон пропарювався без попередньої витримки, ще не має структурної міцності і ТВО його відбувалася без фіксації первинного розміру жорсткою металевою формою, а тиск, що утворився в порі, достатній для того, щоб розсунути шари бетону, що оточують її.

Якщо ж бетон твердне у формі, що жорстко фіксує його об'єм, або ж сам по собі має достатню структурну міцність, то при нагріванні його складові будуть прагнути зайняти об'єм повітряних пор або перешкоджати їх температурному розширенню. Внаслідок цього, парціальний тиск пароповітряної суміші в порах значно підвищуватиметься, і перевищуватиме парціальний тиск середовища камери.

Повітряні пори, що утворилися, залежно від їх розташування по перерізу виробу, знаходитимуться в різних умовах унаслідок різниці гравітаційної дії навколишніх шарів бетону. Внаслідок цього пористість пропареного бетону по перерізу виробу буде різною залежно від товщини виробу.

Рух повітря, що знаходиться в бетоні, під дією тепла здійснюється в основному вгору, до відкритої поверхні виробу і найменшого по висоті перерізу, що призводить до деформації і розшарування верхніх шарів бетону. Але даний процес спостерігається, в основному, при пропарюванні свіжовідформованих виробів без форм при режимах зі швидким підйомом температури. При пропарюванні виробу у відкритій формі повітря прагне вийти назовні і деформує лише

відкриту поверхню. Якщо ж форма закрита з усіх боків, а її жорсткість і створюване зовнішнє обтискання достатнє, то явних структурних порушень бетону не спостерігається.

З вищесказаного виходить, що на стадії підвищення температури створюються сприятливі умови для хімічних реакцій, оскільки при підвищеній температурі в бетоні повністю зберігається кількість води розчинення. Проте цей етап несприятливий для формування фізичної структури внаслідок явищ, що приводять до утворення в ній різноманітних дефектів. Від правильного вибору тривалості періоду підйому температури залежить ефективність подальшого твердіння бетону.

3. Ізотермічне прогрівання.

Після підвищення в камері температури до заданого максимуму форму з виробом переміщують в зону ізотермічного прогрівання, тоді виріб піддають ТВО при заданій постійній температурі. Протягом цього етапу остаточно фіксуються все ті дефекти структури, які отримав бетон в період нагріву.

Проте, температурна рівновага в цей період може порушуватися внаслідок теплового ефекту реакції гідратації цементу. В цей час відбувається віддача тепла від виробу в навколишнє середовище і випаровування води. Дослідження зміни вологісного стану і температури виробу при ТВО проводилися Н. Б. Марьямовим. На їх основі Н. Б. Марьямов [23] зробив висновок, що протягом невеликого проміжку часу внаслідок теплового ефекту реакції гідратації цементу температура бетону значно збільшується і може перевищити температуру середовища на 6 – 8 °С.

Прискорення процесу гідратації цементу шляхом підвищення температури твердіння обумовлює прискорення тепловиділення. Проте це перевищення буде незначним, оскільки частка цементного тесту в бетоні складає всього 10 – 20% і тепло гідратації витрачатиметься на підігрів заповнювачів, цементу і води бетону. Крім того, відомо, що тепловий ефект реакції гідратації цементу залежить від його мінералогічного складу і тонкості помолу. Тому при застосуванні низькоекзотермічних портландцементів або змішаних цементів температура бетону при пропарюванні буде рівна температурі середовища камери або ж перевищить її на незначну величину. У разі застосування високомарочних швидкотверднучих

цементів при значній їх витраті на 1 м³ бетону, швидкому підйомі температури середовища камери і високому її значенні температура у виробі буде вища й тому відбуватиметься висушування бетону, що небажано. При тепловій обробці бетону особливо небезпечно перевищити температуру кипіння води, оскільки в цьому випадку можливе виникнення великої внутрішньої напруги в той період, коли ще не відбулося остаточне формування структури бетону.

Тоді тепловиділення при гідратації цементу в бетоні не призведе до досягнення температурою значення, що перевищує максимальну температуру в камері, тобто вплив теплового ефекту реакції гідратації цементу відіграє позитивну роль. Воно сприяє швидшому і рівномірному прогріванню всього виробу по перерізу, зменшує температурну напругу і, тим самим, знижує витрати тепла, що йде на прогрівання виробу. За даними Н. В. Марьямова [4], за перших 3 – 4 години ТВО тепло, що виділилося в результаті екзотермічної реакції, складає близько 20% всього тепла, що йде на нагрівання виробів, а дослідження Л. А. Малініної та С. А. Міронова показали [18], що прогрівання свіжозформованих зразків йде приблизно в 1,5 разу швидше, ніж затверділих.

Отже, під час третього етапу інтенсивно протікають процеси утворення нових хімічних зв'язків, що супроводжується значним внутрішнім тепловим ефектом реакції гідратації. Загалом це явище стає позитивним, оскільки сприяє швидшому і рівномірному прогріванню всього виробу по всьому перерізу, зменшуючи температурне напруження і знижуючи витрати тепла, що йде на розігрівання виробу. Але, при виборі режимів ТВО необхідно враховувати небезпеку перевищення температури кипіння води, оскільки в цьому випадку можливе виникнення великого внутрішнього напруження.

4. Охолодження.

На цьому етапі в тепловій камері температура бетону повинна знизитися до температури навколишнього середовища.

Під час переходу виробу із зони ізотермічної обробки бетон має велику температуру і внутрішній тиск пари у виробі перевищує тиск пари навколишнього середовища. За рахунок температурного градієнта, відбувається інтенсивне випаровування вологи з бетону. Під час охолодження виробу і випаровування вологи з поверхні

відбувається міграція вологи з центральних ділянок. Волога, видаляючись у вигляді пари, утворює канали, які йдуть в різні сторони від внутрішніх ділянок виробу до зовнішньої поверхні і сполучають між собою порожнечі і пори, що утворилися в процесі приготування і укладання бетону. Внаслідок цього цементний камінь має більше пор, і після теплової обробки характеризується направленою пористістю, що підвищує водопроникність виробів і що знижує їх морозостійкість. Видалення значної частини вільної води також погіршує умови гідратації цементних зерен при подальшому твердненні бетону в природних умовах. При пропарюванні утворюються щільні плівки продуктів гідратації, які перешкоджають подальшому проникненню води до не гідратованих зерен. утворення при пропарюванні щільних гелів, які містять меншу кількість води, порівняно з гелями, які утворилися при твердненні в нормальних умовах, є наслідком не тільки зменшення дисперсності новоутворень, але також обезводнення бетону в період пониження температури.

Кількість вологи що віддаляється з поверхні бетону при ТВО неоднакова, в основному залежить від складу і щільності бетону, а також від режиму теплової обробки і, за даними різних дослідників, складає 20 – 40% від вологи розчинення. Пластичні бетони, що містять значну кількість вологи розчинення, втрачають більше води, ніж жорсткі. Втрати води також зростають при підвищенні температури тепловологісної обробки.

Під час етапу охолодження знову виникають температурні перепади по товщині виробів, що приводять до утворення температурного напруження. Величина цих напружень залежить в основному від товщини виробу, швидкості пониження температури і теплопровідності бетону. Процеси, які протікають при цьому, в бетоні є наслідком не тільки різниці температурних перепадів по перерізу виробу, але і різного температурного розширення окремих складових бетону. При охолодженні бетону його компоненти прагнуть зменшитись в об'ємі, кожний відповідно до власного коефіцієнту температурного розширення, внаслідок чого в зонах контакту цементного каменя і заповнювачів виникає напруга розтягу, що знижує міцність. На формування структури бетону при пропарюванні значно впливає форма, яка жорстко фіксує розміри виробу і перешкоджає його вільному розширенню. Температурні деформації

бетону при ТВО слідує за деформаціями форми. В зв'язку з тим, що коефіцієнт температурного розширення свіжосформованого бетону вищий, ніж у металу, форма в період підйому і зниження температури обжимає виріб, сприяючи отриманню щільнішої структури. Бетони, що пропарюються в жорсткій формі, як правило, не мають залишкового розширення.

Не дивлячись на те, що під час ТВО постійно існують умови, що викликають структурні дефекти бетону, можна шляхом правильного вибору умов, а також призначення відповідного підбору компонентів отримати бетони з високими технічними властивостями.

Величини максимальних деформацій з пониженням швидкості підйому температури зменшуються, що вимагає застосування режимів з повільним прогріванням або із ступінчастим підйомом температури. Температурний градієнт, що виникає між температурою на відкритій поверхні і центром виробу (Δt) збільшується із збільшенням товщини виробу і інтенсивності підйому температури та із зменшенням витрати цементу і величини теплового ефекту реакції гідратації цементу.

Допустима швидкість пониження температури залежить і від міцності бетону, отриманої до закінчення ізотермічного прогрівання виробу. Температурний градієнт призводить до утворення напружень розтягу. Тому чим вище міцність бетону, тим більше напруження він може сприйняти без руйнування.

При підвищених вимогах до водонепроникності і морозостійкості бетону, доцільно охолоджувати вироби шляхом зрошування їх водою з поступовим пониженням її температури до температури навколишнього середовища.

В деяких випадках видимі тріщини не утворюються навіть тоді, коли вироби розформовують з температурою 70 – 80°C і перепад між температурами виробу і навколишнього середовища складає 60 – 70°C. Спостереження показали, що тріщиноутворення в період охолодження залежить від виду та ступеня армування, міцності бетону, масивності виробу і інших чинників. Вибір режимів ТВО повинен ґрунтуватися на врахуванні цих обставин.

Аналіз впливу різних чинників на структуроутворення бетонів показує, що деструктивні процеси в твердіючому бетоні можуть бути зведені до мінімуму внаслідок застосування комплексу заходів. Залежно від вимог, що висуваються до готового матеріалу (міцність,

тріщиностійкість, морозостійкість, проникність) на основі знання механізму тепломасообміну, повинні бути вибрані раціональний метод і режим тепловологісної обробки. Облік кінетики теплообміну, а також негативних дій на структуроутворення бетону дозволяє впливати на процес ТВО і як наслідок, отримання якісної готової продукції.

1.1.5 Тепло-масообмінні процеси тепловологісної обробки

Тепловологісною називають таку теплову обробку, коли нагрівають матеріал в якому зберігається волога. Таку обробку застосовують для прискорення твердіння бетонних виробів. В цьому випадку теплоносії контактує з поверхнею матеріалу, обмінюється нею теплотою і масою. Цей процес називають зовнішнім тепло- і масообміном. Потім між поверхнею матеріалу, яка отримує теплову енергію і масу від теплоносія, і внутрішніми шарами матеріалу починається внутрішній (відносно матеріалу) тепло- і масообміном. Процес тепловологісної обробки є завершальним для виробництва збірних бетонних виробів.

Суть традиційної технології з використанням нормальних умов витримки полягає в змішуванні складових бетонної суміші при температурі 20°C. При розгляді тепло-масообміну в бетонній суміші головну роль відіграє тепло-масообмін між зернами заповнювачів і розчинною складовою. На рис. 1.3 представлена модель структурної комірки бетону.

При розчиненні бетонної суміші водою на поверхні розподілу крупний заповнювач – цементний розчин протікають складні фізико-хімічні процеси, характер яких визначає адгезійні зв'язки між заповнювачем і цементним каменем, а отже, і властивості бетону. Стан контактної зони значною мірою визначає основні фізико-хімічні властивості бетону.

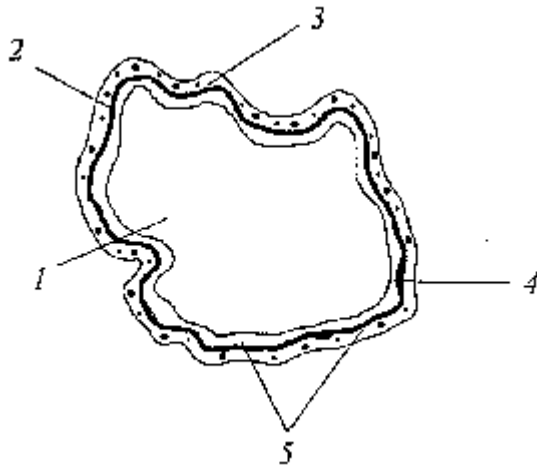


Рис. 1.3. Модель структурної комірки бетону: 1 - зерно заповнювача; 2 і 3 - контактні шари зерна і цементного каменя; 4 - дрібні зерна заповнювача (менше 0,315 мм), що увійшли до цементуючого шару; 5 - повітряні пори в цементуючій речовині.

Процес формування цементного каменя породжує велику кількість його фазово-реологічних станів, кожному з яких відповідає певна стадія твердіння розчинної складової. В цьому випадку контактний шар можна розглядати як складну систему, характер твердіння якої багато в чому визначає структуру бетонної суміші.

В розчинній частині бетону переважають мікропори з радіусом від 10^{-5} до 10^{-8} см. [23], і вони починають відбирати вологу із заповнювачів, що з однієї сторони сприяє процесу твердіння бетонної суміші, а з іншої – вповільнює процес гідратації. На цій стадії зчеплення між заповнювачем і розчинною складовою, зростатиме за рахунок її твердіння.

Виходячи з вищенаведеного, процеси фазоутворення можна розділити на дві групи:

- виникнення значної кількості нових фаз, що сприяють підвищенню міцності контактної зони;
- збільшення пористості цементного каменя, що призводить до зменшення міцності контактної зони.

Якщо перша група процесів переважає над другою, то міцність контактної зони шару збільшується. Якщо ж більше вплив процесів другої групи, то міцність контактної зони в порівнянні з властивостями периферійних ділянок знижуються. В цілому можна

сказати, що залежно від вологовмісту, вмісту розчинних речовин, об'ємних деформацій, що виникають в процесі тепломасоперенесення в бетоні, його твердіння відбувається по-різному.

Застосування технології електропідігріву здійснюється шляхом безпосереднього включення свіжоукладеного бетону в електричний ланцюг як активного опору, внаслідок чого фізико-хімічні процеси гідратації і структуроутворення бетону протікають в умовах електромагнітної дії.

Процеси тепломасоперенесення при застосуванні електропрогрівання обумовлені існуванням електромагнітного поля, що створюється електродами, а також теплообміном між електродами і бетонною сумішшю. Наявність електромагнітного поля породжує новий вид процесів перенесення, де головну роль грають електрофізичні параметри бетонної суміші, які впливають на тепломасоперенесення і деформативний стан бетонної суміші. Перетворення енергії електромагнітного поля в теплову енергію частково впливає на процес структуроутворення бетону. Таким чином, характер твердіння бетону залежить від взаємодії електромагнітного поля і бетонної суміші. Основними параметрами, які впливають на розподіл електромагнітного поля в бетоні, а, отже, і на характер тепломасоперенесення, є вид і величина електричного струму і схема розстановки і підключення електродів в суміші.

Одним з найбільш відповідальних моментів електропрогрівання є розігрівання бетону. Це пояснюється тим, що структуроутворення бетону на ранній стадії твердіння багато в чому визначається видом і характером зовнішньої дії.

Збільшення швидкості нагріву бетону прискорює процеси гідратації в початковий період твердіння. Але, з іншого сторони, надмірна інтенсифікація нагріву бетону викликає не тільки розвиток деструктивних процесів а й погіршує умови гідратації, що призводить до зниження якості бетону. Із збільшенням швидкості розігрівання розширення матеріалу збільшується. При високих швидкостях розігрівання, внаслідок внутрішнього тиску, в бетоні відбуваються структурні руйнування за рахунок швидкого розширення затисненого повітря і парів води, що утворюються, власних температурних розширень твердих частинок і інтенсивного випаровування вологи з поверхні бетону при підвищених температурах. Також необхідно

запобігати втратам вологи які залежать як від складу бетону, так і від умов в яких знаходилась суміш під час електропрогрівання [23].

При повільному розігріванні конструкцій температура всередині бетону встигає перерозподілитися, що розширюючись повітря і пари води виходять з відкритих пор, завдяки чому внутрішній тиск стає нижчим і не руйнує структуру [18]. З іншого сторони, можливе погіршення струмопровідних властивостей бетону за рахунок того, що із пониженням температури рух іонів сповільнюється. Основне наростання міцності, відбувається під час ізотермічного прогрівання. В ізотермічному режимі температурне поле в бетоні з часом стає більше однорідним, внаслідок чого теплообмінні процеси протікатимуть менш інтенсивно та ними можна буде знехтувати. В той час, саме в цьому режимі найбільшими вологовтрати суміші, ними можна пояснити збільшення масоперенесення разом із зниженням теплоперенесення, так що він матиме дифузійний характер. Разом з тим збільшення міцності бетону в ізотермічному режимі пояснюється тим, що в цей період за рахунок видалення вологи і зниження гідростатичного тиску відбувається ущільнення цементного каменя в розчинній складовій, омагнічення вологи, що залишилася в ній, що сприяє поліпшенню зчеплення заповнювачів з розчинною складовою.

На стадії охолодження протікання тепло-масообмінних процесів визначається швидкістю зниження температури. У тому випадку, коли температура знижується поступово, тепло-масоперенесення в суміші із зменшенням електромагнітного поля буде все більше залежати не стільки електрофізичними, скільки фізико-хімічними характеристиками суміші.

Електропрогрівання залежно від виду вживаного струму можна розподілити відповідно на електропрогрівання змінним і постійним струмом змінної полярності. Очевидно, що при використанні змінного і постійного струмів за інших рівних умов розподіл електромагнітного поля буде різним, що, у свою чергу, визначатиме характер твердіння бетону.

Таким чином, основна відмінність електропрогрівання від технології з використанням нормальних умов витримки полягає в тому, що існує можливість безпосередньо управляти якістю і

характером твердіння бетону шляхом зміни зовнішньої електротеплової дії.

Технологія електропрогрівання бетону має ряд істотних недоліків. Основними недоліками є : негативний вплив арматури та металевих форм на рівномірність прогрівання, відсутність ефективних способів електроізоляції лінії бортів форм і арматури тощо. Недоліками способу попереднього електророзігрівання є: порівняно швидка втрата рухливості бетонної суміші, необхідність чіткої і ритмічної організації робіт.

Одним з найбільш поширених способів інтенсифікації твердіння бетону є паропрогрівання бетонної суміші, при якому теплова енергія бетону передається за допомогою нагрітого (зазвичай рухомого) пароповітряного середовища.

Пара і надлишковий тиск, проявляючи свою дію (або діючи), як правило, спільно, є важливими технологічними факторами, які суттєво впливають як на ефективність обробки бетонної суміші і твердіючого бетону, так і на якість бетону. Можна виділити наступні випадки прояву цих факторів [24]:

- тиск і пара призначаються, тобто свідомо застосовуються як технологічні прийоми для обробки бетонної суміші або твердіючого бетону;
- тиск і пара проявляються як супутні при обробці суміші або бетону за допомогою інших технологічних прийомів;
- тиск і пара використовуються або діють тільки на бетонну суміш;
- тиск і пара використовуються або діють тільки на твердіючий бетон.

Умови прикладання і момент дії тиску і пари на різних етапах перетворення бетонної суміші в бетон мають результуючий ефект у вигляді підвищення або зниження якості бетону і величини енерговитрат на його термообробку.

Сумісний вплив надлишкового тиску і пари на твердіючий бетон дещо знижує негативний вплив деструктивних процесів. Внутрішній тиск, що виникає за рахунок об'ємних розширень компонентів бетону, частково врівноважується зовнішнім надмірним тиском. Створення надмірного тиску у вигляді привантаження сприяє додатковому приросту міцності бетону на 10 – 15%.

З міркувань зведення до мінімуму негативного впливу деструктивних процесів і збільшення глибини гідратації цементу сумісній дії пари і надлишкового тиску доцільніше піддавати не твердіючий бетон, а бетонну суміш. В цьому випадку об'ємні розширенні компонентів бетонної суміші відбуваються в її пластичному стані. Дія надмірного тиску до початку настання індукційного періоду процесу гідратації цементу сприяє збільшенню глибини реакцій гідратації. Якісна сторона процесів, що відбуваються при цьому, може бути представлена таким чином. Тиск і пара діють на бетонну суміш на фоні основної технологічної дії на неї - підвищеної температури. Під впливом високої температури різко інтенсифікуються реакції гідратації цементу. Навколо цементних зерен виникають оболонки з продуктів новоутворень, які на першому етапі залишаються достатньо рихлими. В'язкість вільної води при підвищеній температурі істотно зменшується, а проникність пари на порядок вище проникання води при однакових з нею температурах. Під дією надлишкового тиску волога по мікропорах проникає в глиб частинок цементу, збільшуючи ступінь його гідратації.

При підйомі температури в процесі пропарювання виробів в камері на поверхні бетону конденсується волога. Температура плівки конденсату вища за температуру поверхні виробу, але нижча за температуру пароповітряного середовища. Тому поверхневий шар бетону нагрівається інтенсивніше, ніж нижній, оскільки коефіцієнт тепловіддачі до відкритої поверхні бетону набагато вищий, ніж через стінку форми. Із збільшенням товщини пропарюваного виробу значення температурного градієнта зростає і потік тепла направлений зовні до центру. Волога, яка знаходиться на поверхні, мігруватиме всередину бетону. Мігруючи слідом за тепловим потоком, волога може зруйнувати неміцну структуру гідратних новоутворень цементного каменя, збільшити радіус мікрокапілярів, ослабити неміцний контакт зв'язуючої маси із зернами заповнювачів, створити направлену пористість на поверхні виробу.

Компоненти бетонної суміші, нагріваючись, збільшуються в об'ємі. Повітря, що міститься в бетонній суміші, а також вода, основна кількість якої відразу після формування знаходиться у вільному стані, при нагріванні розсовують частинки бетонної суміші, тим самим, підвищуючи пористість [13]. Також за рахунок розширення істотно

зростає об'єм відкритих пор бетону. Надалі, з набуттям процесами тепло-масообміну стаціонарного характеру, твердіння бетонної суміші пов'язане з виділенням тепла в навколишнє середовище, що частково обумовлене тепловиділеннями при реакції гідратації.

На стадії охолодження тепловий потік рухається у напрям периферії. Це сприяє випаровуванню вологи з відкритої поверхні бетону і, внаслідок цього, підвищенню температури від екзотермії цементу. Бетон, що знаходиться в центрі, починає негативно впливати (температурне розширення) на затверділі раніше зовнішні шари бетону, що, зрештою, приводить до тріщинуватої поверхні бетону. Тріщини будуть тим більше, чим більше буде різниця температур між центром і периферією [12].

До недоліків паропрогріву відносяться деструктивні процеси, які відбуваються в свіжо укладеному бетоні на всіх стадіях теплової обробки й великі енерговитрати, оскільки не забезпечуються постійні в часі консистенція і температура бетонної суміші. При цьому також виникають проблеми з охороною довкілля [6].

Теплова обробка твердіючого бетону парою є найбільш поширеним прийомом прискорення набору міцності при виготовленні збірних конструкцій в заводських або полігонних умовах [54, 55, 56, 57]. Про негативний вплив пропарювання на твердіючий бетон, який проявляється у вигляді деструктивних явищ, що призводять до зниження фізико-механічних характеристик бетону йшла мова в п.1.1.2. Зазначимо, що пропарювання бетону є одним з найбільш витратних методів його термообробки це пояснюється низьким ККД використання пари (див. п. 1.1.2). Як було відмічено, пара є основним теплоносієм при тепловій обробці бетону, для цього більшість підприємств повинні мати власну котельню або постачати пару від ТЕЦ. З цього виникають відомі недоліки пропарювальних установок: великі капітальні затрати на будівництво і експлуатацію котельні, нестабільність параметрів пари, неоднорідність температурного поля у виробі при його тепловій обробці, забруднення довкілля продуктами згорання.

1.2 Аналіз конструктивних рішень теплогенераторів аеродинамічного типу

Альтернативою розглянутим технологіям (рис. 1.1, 1.2) може стати застосування новітньої технології аеродинамічного нагріву [25, 26, 27, 29], згідно якої, основний теплогенеруючий пристрій – аеродинамічний нагрівач роторного типу здійснює безперервну рециркуляцію повітряного потоку і внаслідок аеродинамічних втрат в ньому відбувається постійний нагрів повітряного середовища у замкненому просторі теплоізованої робочої камери [59, 60, 61]. Потік гарячого повітря, що здійснює рециркуляцію в робочій камері, передає тепло елементам робочої камери і рівномірно розігрівляє виріб. В процесі нагріву виробу відбувається видалення вологи з його поверхні та із внутрішнього об'єму тіла виробу в повітряне середовище робочої камери. Для забезпечення необхідного тепловологісного балансу в повітряному середовищі робочої камери додатково подається вода. Для цього над аеродинамічним нагрівачем відбувається розбризкування води через форсунки. Вода під дією високої температури перетворюється в пару і разом із теплим повітрям рециркулює всередині робочої камери, створюючи відповідне за тиском і температурою пароповітряне середовище, яке здійснює подальше нагрівання і зволоження поверхні та внутрішнього об'єму виробу.

Одним із перших способів отримання теплової енергії із аеродинамічного потоку були способи нагріву газових потоків шляхом гальмування їх у газопроникному (пористому тілі), наприклад , установка, що описана у [29].

Установка являє собою піч газодинамічного нагріву, в теплоізолюючому корпусі якої встановлено вентилятор і піддон для матеріалу, що нагрівається. Відрізняється піч тим, що з метою збільшення теплопродуктивності печі і інтенсифікації процесу нагрівання вона оснащена муфелем з пористими газонепроникними стінками, торцева частина яких виконана газонепроникною.

Недоліком таких способів нагріву була низька питома теплопровідність.

Іншими способами генерації тепла були способи, які пов'язані з газодинамічним нагріванням газу ударними хвилями. При цьому потік

газу подавався в ряд глухих каналів, що розташовувались по осі або під певним кутом до осі газового потоку. В тупикових глухих каналах виникав ударно – хвильовий процес, що призводив до виділення тепла. За допомогою циркулюючої охолоджувальної рідини, що омивала зовні патрубки цих тупикових глухих каналів, тепло відводилось до споживача. Характерними представниками, в яких відтворено такий спосіб генерації тепла є установки, що реалізовані відповідно у [28].

Пристрій містить трубопровід, який має звуження по ходу газового потоку, що транспортується, і розміщене під кутом $15...30^\circ\text{C}$ до осі трубопроводу в один ряд тупикові патрубки з суцільним вхідним перерізом.

Заглушений канал патрубків примикає до каналу для охолодного середовища, що циркулює. Канал на висоту патрубка покритий тепловою ізоляцією. Звуження трубопроводу можуть бути утворені за допомогою прикріплених до його внутрішньої поверхні профілігрованих елементів.

На рис. 1.4 приведена конструкція газодинамічного пристрою.

Газовий потік, що транспортується рухається в просторі, який утворений трубопроводом і зовнішньою поверхнею теплової ізоляції. В звуженнях потік прискорюється і взаємодіє з газом, який знаходиться в тупикових патрубках і викликає в них ударно-хвильовий процес, який призводить до виділення тепла в тупикових патрубках. При цьому газовий потік охолоджується, а тепло, яке виділилося в тупикових патрубках, відводиться охолоджуючим середовищем, що циркулює по каналу.

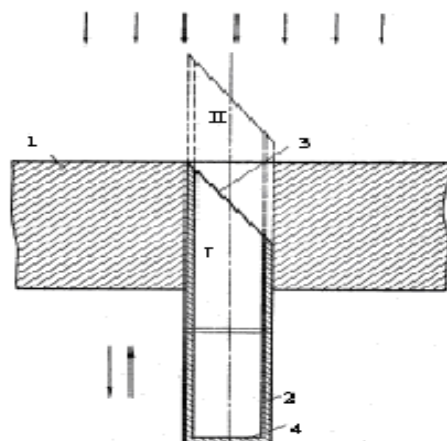


Рис. 1.4. Пристрій газодинамічного типу

Пристрій для газодинамічного нагріву рис. 1.4 містить встановлений в пластині 1 зустрічно до потоку газу патрубок 2 з вхідним косим зрізом 3 і заглушеним заднім торцем 4.

Потік газу, що надходить, потрапляючи в патрубок 2, гальмується в напрямку заглушеного заднього торця 4. Тепло, яке при цьому виділилось може передаватися споживачеві. Максимальна температура досягається, коли патрубок знаходиться в своєму верхньому положенні відносно пластини 1. Поздовжньо переміщаючи патрубок 2, можна регулювати температуру загальмованого потоку газу.

Недоліками пристроїв, що реалізують спосіб генерації тепла, завдяки ударно – хвильовим процесам, є також мала термодинамічна ефективність, тому що у процесі приймає участь тільки певний граничний шар транспортованого газового потоку, що попадає в зону взаємодії з глухими тупиковими каналами.

Більш досконалими є способи генерації тепла, які на газовий потік під час гальмування накладають поле відцентрових сил. Так, наприклад, пристрій, що описаний [22] і включає ротор, що з'єднаний з електродвигуном, розташований у теплоізовльованому корпусі. При обертанні ротора в ньому проходить тепловиділення за рахунок гальмування потоку газу у полі відцентрових сил, а також аеродинамічного стиснення і вихрового ефекту.

Конструкція турбулізатора наведена на рис. 1.5.

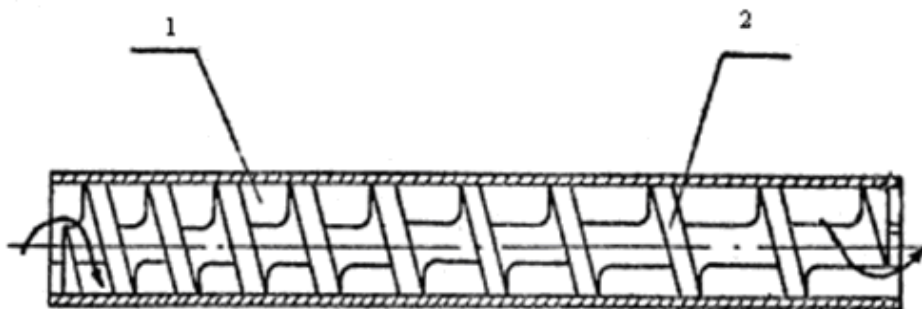


Рис. 1.5. Турбулізатор ротора аеродинамічного нагріву

Суть його полягає в тому, що ротор аеродинамічного нагрівача, включає нагнітальні лопатки і розміщені в його проточній частині турбулізатори, що виконані у вигляді радіально орієнтованих трубок із закріпленими в середині них гвинтовими вставками 2, крок витків яких збільшується по ходу потоку. При обертанні ротора газовий потік, що всмоктується в його порожнину, нагнітається відцентровими силами,

проходячи через радіально розташовані турбулізатори 1, випробовує спочатку різке стиснення на вході, закручування і розширення. Все це призводить до значних гідравлічних втрат напору, які переходять у інтенсивне тепловиділення.

Конструкція аеродинамічного теплогенератора наведена на рис.1.6.

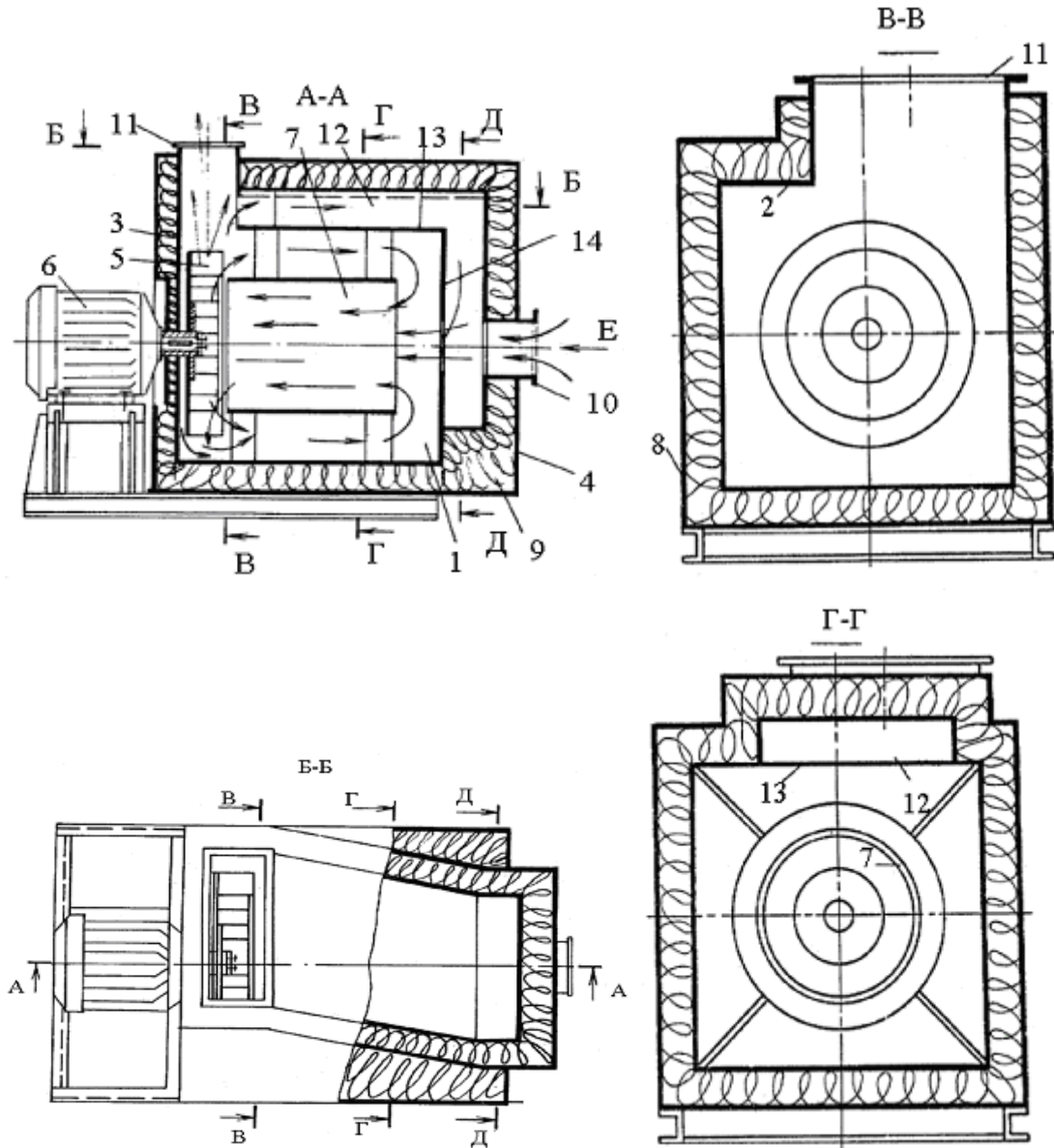


Рис. 1.6. Аеродинамічний теплогенератор

Підвищення потужності приводу – електродвигуна 6, і відповідно, еквівалентної їй теплової потужності камери 1, а також подача і напір досягається тим, що при роботі теплогенератора в ньому встановлюється циркуляція повітря в камері по тракту з подвійним контуром: в основному контурі замкнутому, від ротора 5 вздовж екрану 7, зовні і всередині нього і в додатковому розімкнутому

рециркуляційному контурі - в каналі 12 від патрубку 11 до патрубку 10, на вхід в екран і до всмоктуючого отвору ротора, з виходом частини потоку зовні до споживача через патрубок 11. 2 – поздовжні стінки, 3,4 – торцеві стінки, 8 – сталевий корпус, 9 – ізоляція, 13, 14 – поздовжня і торцева стінки циркуляційного каналу.

На рис.1.7 наведено конструкцію теплогенератора, принцип дії якого полягає в наступному. Холодне повітря через патрубок 6 подається в камеру 9, де вентилятором 2, що працює в холодному режимі, створюється необхідний високий тиск. Далі повітря потрапляє під створений тиском нагнітача по каналу 13 в патрубки 12 охолоджуючи частини валу 1, які в них знаходяться. Гаряче повітря під високим тиском через патрубок 8 нагнітається в систему споживання теплової енергії. 3 – відцентрові вентилятори, 4 – корпус, 5 – торцева кришка, 7 – перегородка, 11 – камера, 10 – обичайка, 14 – стінка.

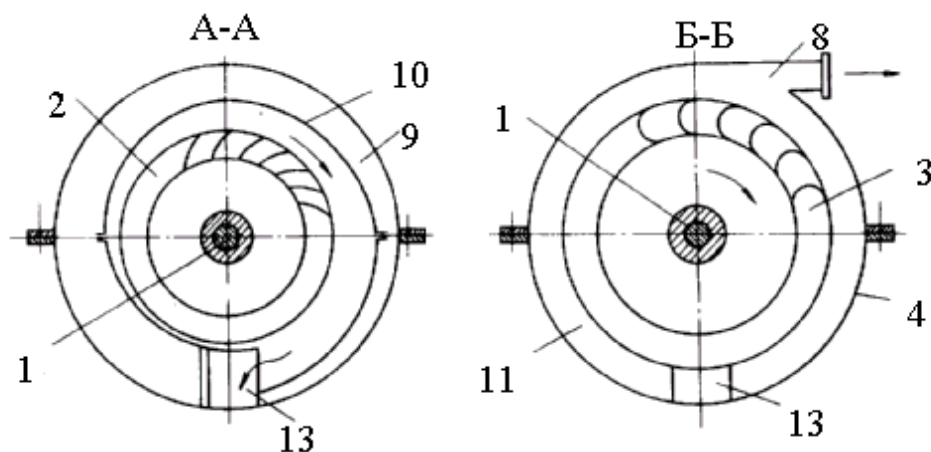


Рис 1.7. Теплогенератор аеродинамічний

Сутність цих технічних рішень полягає у генерації теплової енергії завдяки спільній взаємодії таких факторів як тертя по стінках корпусу вентилятора, а також внутрішнього тертя у газовому потоці, втрати на місцевих опорах.

Дана рециркуляційна нагрівальна установка призначена для розігрівання через теплообмінні поверхні рідкого середовища (газу чи рідини), що переносить тепло. Завдяки рециркуляції повітря у внутрішній замкнутій порожнині теплоізовованого корпусу під напором, що створюється робочим колесом вентилятора, відбувається його розігрівання, причинами якого, як і у попередніх конструкціях

тепло генераторів, є комбіновані види гідравлічних втрат енергії переміщуваного потоку газу по конструктивних елементах робочого колеса вентилятора та спіральних каналів, що утворені на поверхні теплообмінника. Циркулюючий через теплообмінник зовнішній теплоносій відбирає утворене всередині теплогенератора тепло і передає його споживачам.

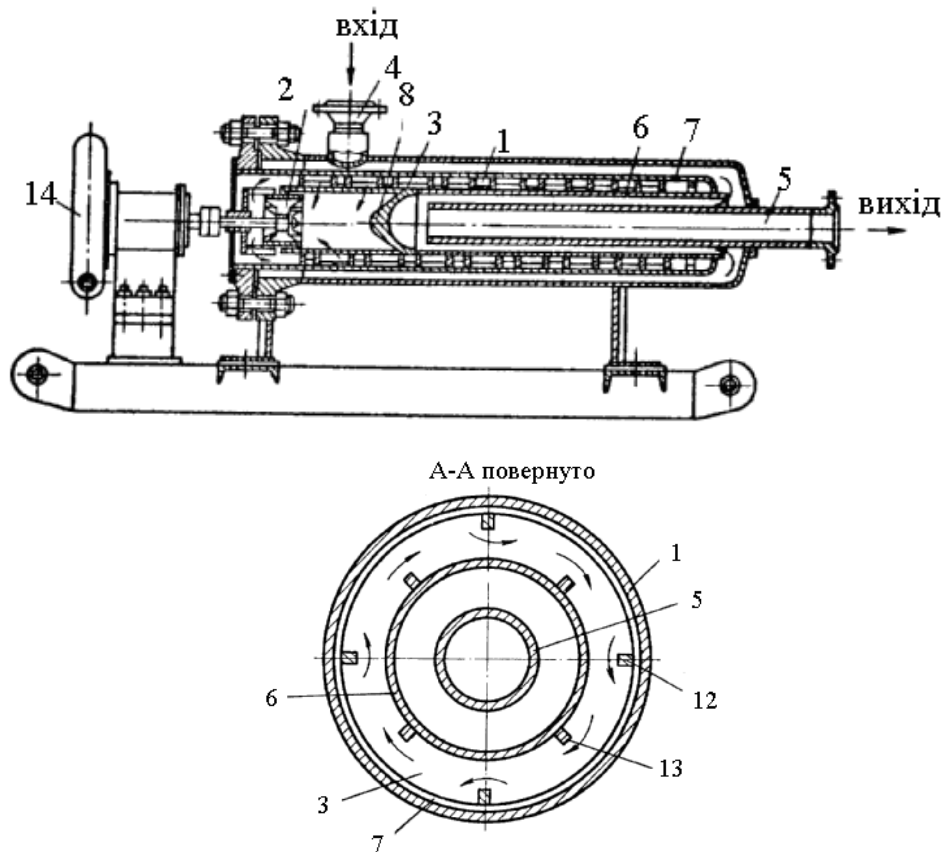


Рис. 1.8. Пристрій для розігрівання газового середовища: 1 – корпус; 2 – привідне колесо; 3 – міжтрубний простір; 4, 5 - вхідний і вихідний патрубки; 6, 7 – труби теплообмінника; 8 – торець внутрішньої труби; 9 – гвинтові вставки; 10, 11 - ходи міжтрубного простору; 12, 13 – поздовжні ребра; 14 – привід колеса.

Пристрій представлений на рис.1.9, працює таким чином. При обертанні ротора 1 повітря засмоктується через вхідний отвір 6 і патрубків 9, нагрівається в міжлопатеких каналах ротора і нагнітається у всі сторони по колу ротора. У камері 2 повітря, що нагнітається, розділяється на два потоки і по каналах, утворених перегородкою 8 і стінкою 5 або стінкою 3, прямує в протилежні сторони.

Один потік потрапляє в порожнину а камери. Інший потік прямує в порожнину б, де він розвертається на 180° і через канал між перегородкою 8 і стінкою 4 або стінкою 5 також потрапляє в порожнину а камери. У порожнині а обидва потоки змішуються, повертаються на 90° і нагріте повітря під натиском закінчується з вихідного отвору 7.

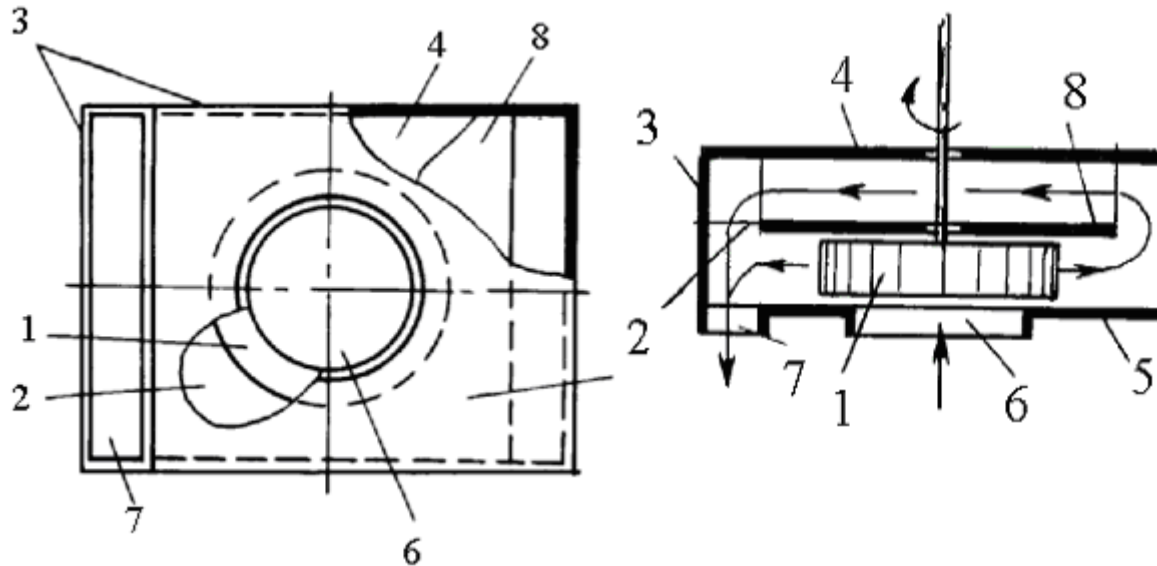


Рис. 1.9. Аеродинамічний теплогенератор

На рис. 1.10 наведена ще одна конструктивна схема теплогенератора.

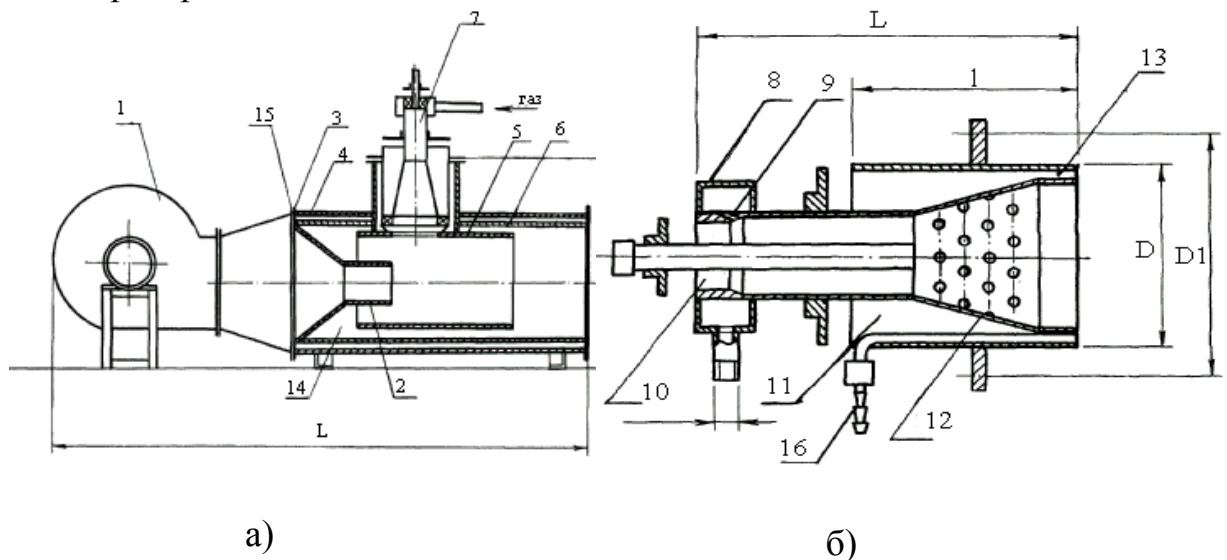


Рисунок 1.10 – Теплогенератор рециркуляційний газовий: а) принципова схема установки; б) конструктивна схема пальника багатостадійного спалювання.

Теплогенератор призначений для генерації теплоносія змішувальним способом. Оригінальний пальник 7 має два регульовані підведення повітря 10 і 11. Первинна газоповітряна суміш пронижується повітряними струменями через дифузор 12 і розбавляється вторинним повітрям. Третя порція повітря, що закінчується з кільцевого зазору 13, остаточно формує факел з $\alpha = 1,02-1,07$. Спалювання палива в три стадії обумовлює мінімальний вихід оксидів азоту (NO_x) і монооксида вуглецю (CO). Виконання пальника повністю металевим підвищує його надійність і простоту в експлуатації. 1 — вентилятор, 2 — насадка, 3 — фланець, 4 — корпус, 5, 6 — внутрішня і зовнішня обичайки, 8 — газовий колектор, 9 — отвори газового колектора, 14 — підведення води, 15 — об'єм для теплоносія, 16 — відбірник.

2 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ

2.1 Обґрунтування генерації теплової енергії в установках із аеродинамічним нагрівачем роторного типу

2.1.1 Аналіз балансу енергії при генерації тепла в робочому колесі

Аеродинамічний нагрівач роторного типу (АНРТ) [25, 59, 60, 61] з приєднаними до нього всмоктуючими та нагнітальними розподільчими каналами показаний на рис. 2.1.

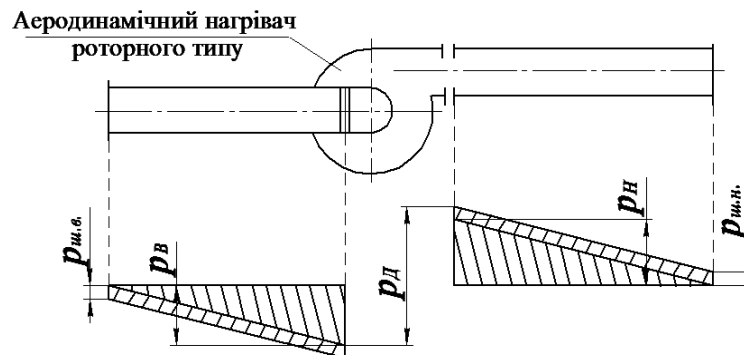


Рис. 2.1. Схема установки з аеродинамічним нагрівачем
роторного типу

Дійсний тиск p_d витрачається на покриття втрат у всмоктуючих розподільчих каналах p_v та нагнітальних розподільчих каналах p_n та втрат на забезпечення заданої вихідної швидкості $p_{ш.н.}$.

Баланс розподілення енергії повітря у АНРТ може бути представлений у вигляді дійсного тиску p_d :

$$p_d = p_v + p_n + p_{ш.н.} \quad (2.1)$$

Витрата енергії на створення швидкості у всмоктуючих розподільчих каналах $p_{ш.в.}$ за рахунок дійсного тиску p_d , створеного АНРТ, тут не відбувається. Ця швидкість і відповідний їй динамічний тиск $p_{ш.в.}$ створюється атмосферним тиском при наявності розрідження на вході, який дорівнює p_v . Тому величина в рівнянні балансу енергії

$p_{ш.в.}$ не відображається і не враховується. Використовуючи правила розмірностей можна написати рівняння

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Дж/м}^3, \quad (2.2)$$

звідки можна зробити висновки, що дійсний тиск p_d – механічна енергія, яку отримало повітря в АНРТ на кожний кубічний метр. Механічна енергія, яка витрачена на переміщення повітря складе

$$W = L \cdot p_d, \text{ [Вт]}. \quad (2.3)$$

Це і є механічна робота, яку виконує повітря при переміщенні в розподільчих каналах. Повітря може виконати її завдяки тому, що отримало необхідний запас енергії в АНРТ.

Для визначення кількості енергії, яка витрачається на привід ротора аеродинамічного нагрівача, при умові, що повітря отримало в ньому запас енергії, який дорівнює W , позначимо через W_e . Тоді $W_e > W$, тобто споживана приводом АНРТ енергія W_e більша, ніж енергія W , яка отримана в ньому переміщуваним повітрям. Така нерівність пояснюється тим, що ККД АНРТ не дорівнює 1. В аеродинамічному нагрівачі є втрати на тертя дисків ротора об середовище, в якому вони обертаються, на тертя і вихороутворення в міжлопатевих каналах робочого колеса, на тертя при русі повітря по напрямних раглика кожуха, на удар при виході повітря із міжлопатевих каналів робочого колеса до порожнини раглика кожуха, втрати на вході при повороті потоку від осьового напрямку до радіального і на удар при вході в міжлопатеві канали робочого колеса. Ці втрати потребують затрат додаткової енергії за рахунок приводного двигуна і для повітря є втраченими: повітря в АНРТ отримує корисний запас енергії, який визначається залежністю (2.3).

Для АНРТ зі всмоктуючим та нагнітальним трубопроводами

$$W_e = W' + W, \text{ [Вт]}, \quad (2.4)$$

Тобто механічна енергія, що витрачена на обертання ротора аеродинамічного нагрівача, витрачається на компенсацію втрат W' в АНРТ та компенсацію втрат в розподільчих каналах. Втрати W' в

АНРТ, в кращому випадку, складають в межах 20% витраченої на обертання ротора механічної енергії W_e . Втрати тиску на подолання тертя в розподільчих каналах для переміщення повітря є корисною роботою АНРТ. Їх можна виразити через вихідну швидкість:

$$p_{ш.н.} = c^2 \cdot \rho / 2g, \text{ [Па або Дж/м}^3\text{]}. \quad (2.5)$$

Знаючи величину швидкості виходу газу з нагнітальних розподільчих каналів c (м/с), можна визначити втрати з вихідною швидкістю. Сума втрат на покриття опорів в розподільчих каналах складає:

$$p_D - p_{ш.н.} = p_B + p_H \quad (2.6)$$

Ці втрати перетворюються в теплову енергію. Але АНРТ завжди переміщує повітря, яке й переносить цю теплоту до виходу з нагнітальних розподільчих каналів, за винятком певних втрат тепла в навколишнє середовище через теплоізоляцію корпусу установки.

Втрати W' в АНРТ не зникають. Вони проявляються в поступовому підвищенні температури повітряного середовища, що переміщається АНРТ та викидається з нагнітальних розподільчих каналів з певною вихідною швидкістю, але їх важко визначити, оскільки збільшення температури ледь помітне, хоча потужність, яка витрачається на привід АНРТ, досягає в багатьох випадках значної величини.

На рис. 2.2 показана установка з АНРТ, що працює в замкнутій системі розподільчих каналів.

АНРТ переміщує по замкнутій системі розподільчих каналів один й той самий об'єм повітря, що перебуває в розподільчих каналах та самому аеродинамічному нагрівачі. В замкнутій системі розподільчих каналів є втрати на покриття опорів, оскільки в них виникає рух повітря з визначеною швидкістю. Ротором аеродинамічного нагрівача ці втрати безперервно поновлюються. В АНРТ також є свої втрати та визначена витрата потужності або механічної енергії на обертання ротора.

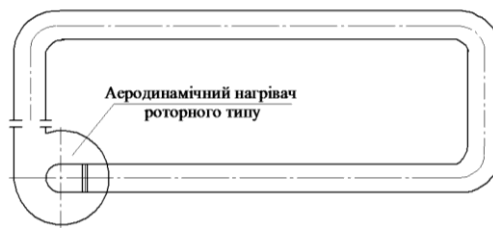


Рис. 2.2. Схема установки із аеродинамічним нагрівачем роторного типу із замкнутою системою розподільчих каналів

Після пуску двигуна, що приводить в обертальний рух ротор, в пропарювальній камері виникає нагрів розподільчих каналів і корпусу робочої камери. Нагрів повітря всередині замкнутої системи визначається за приладами для вимірювання температури. Нагрів стане ще більш інтенсивним, якщо система розподільчих каналів та АНРТ будуть ізольовані для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище. В цьому випадку вся механічна енергія W_e , що витрачається на обертання ротора, переходить в теплоту, що здійснюватиме нагрівання повітря, яке рухається в замкнутій системі. Втрати W' в АНРТ, а також втрати W в розподільчих каналах також є корисними та переходять в теплоту, що нагріває повітряне середовище в робочій камері.

Таким чином, АНРТ є нагрівачем повітря. Його ККД має досить високе значення критерію ефективності, оскільки майже всі 100% витраченої на обертання ротора механічної енергії W_e переходять в теплоту. Витрачена на обертання ротора механічна енергія W_e в цілому визначає роботоспроможність ротора q , а при переведенні одиниць теплоти в тепловий ефект ротора, як нагрівача повітря, вона виражається таким співвідношенням:

$$q = A \cdot W_e = W_e / 427, [\text{Вт/год}] \quad (2.7)$$

де $A = 1/427 \text{ Вт/кг} \cdot \text{м}$ – тепловий еквівалент роботи.

При визначенні аеродинамічних характеристик роторів аеродинамічних нагрівачів, що застосовуються для установок з АНРТ, виявлена залежність роботи [25], що витрачена на обертання ротора, від кількості повітря, що переміщується у вигляді функції:

$$W_e = f(v), [\text{Вт}]. \quad (2.8)$$

при густині повітря $\rho_{\text{п}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Роботоспроможність ротора W_e та його тепловий ефект залежать від густини повітря, що переміщається ротором, та пропорціональні йому. Але повітря, що знаходиться в робочій камері, нагрівається, а його густина з підвищенням температури зменшується [26]. Тепловий ефект та роботоспроможність ротора зменшуються з підвищенням температури в робочій камері.

Виходячи із рівняння стану газу (рівняння Клапейрона), можна записати наступне:

$$M = p/R \cdot T, \quad (2.9)$$

де M – масова витрата повітря, кг/с;

p – абсолютний тиск повітря, що знаходиться в робочій камері, Па;

R – газова стала, Дж/кг·К;

T – абсолютна температура повітря або газу в робочій камері, К.

Абсолютний тиск p змінюється не досить суттєво (ротор створює відносно незначний надлишковий тиск), а тому масова витрата повітря, що переміщається ротором, обернено пропорційна абсолютній температурі в установці. Це відноситься також і до теплового ефекту та роботоспроможності ротора, які враховуються при розрахунках установок з аеродинамічним нагрівом. Таким чином, змінюючи перерізи всмоктуючих чи нагнітальних розподільчих каналів ротора аеродинамічного нагрівача, можна регулювати його продуктивність. Температура в робочій камері буде змінюватись згідно заданого режиму.

В рециркуляційних нагрівальних установках [25], якщо не враховувати втрати тепла в навколишнє середовище через теплоізоляцію корпусу установки, ККД стає близьким до одиниці, так як майже вся витрачена на привід механічна енергія W_e переходить в теплоту, нагріваючи повітря. Ефект теплоутворення залежить в основному від параметрів аеродинамічного нагрівача. Втрати всередині АНРТ, що виникають при русі повітря, перетворюються в теплоту та підвищують загальний ККД пропарювальної камери. На цьому принципі сконструйовано, виготовлено та на протязі багатьох років експлуатується серія різноманітних установок з АНРТ для різноманітних технологічних процесів [25].

Температура в установках із АНРТ регулюється наступними способами:

- зміною числа обертів;
- періодичними автоматичними включеннями та відключеннями ротора аеродинамічного нагрівача в залежності від теплового балансу в робочій камері;
- автоматичною зміною продуктивності ротора аеродинамічного нагрівача.

В основу способу регулювання температури автоматичною зміною продуктивності ротора аеродинамічного нагрівача закладені властивості повітря змінювати свою густину в залежності від температури.

Як привід ротора установок з АНРТ доцільніше застосовувати електродвигун. Неелектричні приводи, наприклад, двигуни внутрішнього згорання, можуть застосовуватися переважно в польових умовах, зокрема, на будівельних майданчиках, при відсутності системи електропостачання.

2.1.2 Фізична природа генерації тепла в робочому колесі

Енергія, яку повітря отримує в аеродинамічному нагрівачі роторного типу (АНРТ), використовується для його переміщення по розподільчих каналах та покриття втрат в них, пов'язаних з тертям, вихроутворенням, з втратами на місцевих опорах та забезпечення заданої вихідної швидкості [59, 60, 61].

Для пояснення причини генерації теплової енергії при роботі АНРТ розглянемо основні залежності руху повітря в між лопатковому просторі робочого колеса. Виділимо переріз між двома сусідніми лопатками і розглянемо рух повітря в ньому рис. 2.3 [26].

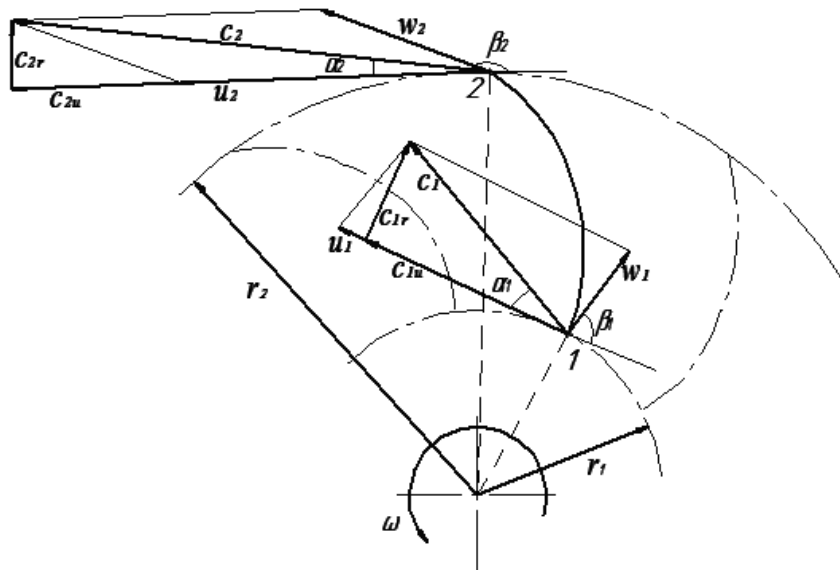


Рис. 2.3. Паралелограми швидкостей в робочому колесі АНРТ

Енергія яка передається повітрю робочим колесом визначається значеннями абсолютних c , відносних w і колових u швидкостей під час входу і виходу з між лопаткового простору.

Нехай на вході в робоче колесо (точка 1) є колова швидкість u_1 , відносна швидкість w_1 та абсолютна швидкість c_1 (рис. 1). Напрямок швидкості w_1 визначається кутом β_1 , який називається кутом входу. На виході з робочого колеса (точка 2) отримаємо відповідно швидкості u_2 , w_2 , c_2 . Напрямок швидкості w_2 визначається кутом виходу β_2 . таким чином на вході і виході з робочого колеса ми отримуємо трикутники швидкостей, рис. 2.4.

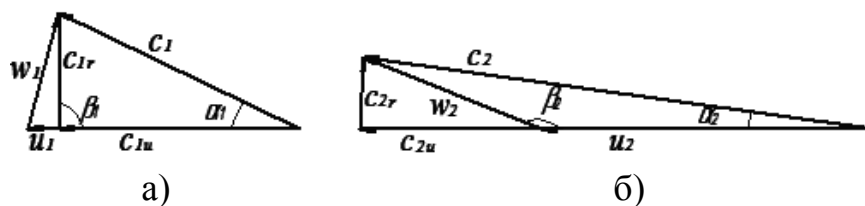


Рис. 2.4. – Трикутники швидкостей в АНРТ:

а) на виході з робочого колеса, б) на вході в робоче колесо

Як видно з даного рисунка, абсолютну швидкість потоку можна розкласти на радіальну (витратну) складову $c_r = c \cdot \sin \alpha$ та колову складову $c_u = c \cdot \cos \alpha$ так звану швидкість закручування.

Відповідно до теореми про зміну моменту кількості руху при встановленому русі зміна моменту кількості руху потоку повітря, яке

проходить через робоче колесо АНРТ за одиницю часу, дорівнює моменту сил M_0 реакції лопаток.

Зміна моменту кількості руху потоку повітря, яке пройшло через робоче колесо АНРТ, дорівнює:

$$\rho L c_{2u}^{\infty} r_2 - \rho L c_{1u}^{\infty} r_1, \quad (2.10)$$

де L – витрата повітря;

ρ – густина повітря;

r_1, r_2 – радіус відповідно вхідного і вихідного перерізу робочого колеса.

Згідно з теоремою та після перетворень отримаємо:

$$M_0 = \frac{1}{2\pi} \rho L (2\pi c_{2u}^{\infty} r_2 - 2\pi c_{1u}^{\infty} r_1) \quad (2.11)$$

Циркуляція повітря навколо лопаток робочого колеса:

$$\Gamma_1 = 2\pi c_{1u}^{\infty}; \quad \Gamma_2 = 2\pi c_{2u}^{\infty}. \quad (2.12)$$

де Γ_1 – циркуляція швидкості на вході в робоче колесо;

Γ_2 – циркуляція швидкості на виході з робочого колеса.

Підставивши (2.11) в (2.12) отримаємо:

$$M_0 = \frac{1}{2\pi} \rho L (\Gamma_2 - \Gamma_1) \quad (2.13)$$

Різниця $\Gamma_2 - \Gamma_1$ дорівнює сумі циркуляції швидкості навколо всіх лопаток робочого колеса. Помноживши обидві частини рівняння (2.13) на кутову швидкість обертання робочого колеса ω_0 , перейдемо до потужності

$$M_0 \cdot \omega_0 = \rho \frac{L \cdot \omega_0}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1) \quad (2.14)$$

де ω_0 – колова швидкість.

Отже, ліва частина виразу (2.14) – визначає роботу, здійснену силами реакції лопаток АНРТ за одиницю часу – потужність, яка передається повітрю лопатками робочого колеса. Дана потужність є потужністю на валу N_B :

$$N_B = \Delta p_T L, \quad (2.15)$$

де Δp_T – теоретичний тиск АНРТ. Робота яку здійснюють сили реакції лопаток робочого колеса віднесено до об'єму повітря, що проходить через АНРТ.

Для пояснення причини генерації теплової енергії при аеродинамічному нагріві визначимо теоретичний тиск з врахуванням вище викладеного та після перетворень запишемо рівняння Ейлера для роботи АНРТ

$$\Delta p_T = \rho \frac{\omega_0}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1) \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) пов'язує тиск АНРТ з швидкістю руху повітря в робочому колесі, яка залежить від подачі, частоти обертання приводу, геометрії робочого колеса тощо.

Зміна теоретичної потужності ΔN_T , внаслідок закручування потоку при проходженні в між лопатковому просторі робочого колеса АНРТ, дає основну частину теплової енергії на нагрівання повітря.

$$\Delta N_T = \rho L \omega_0 [(r_2 c'_{2u} - r_2 c_{2u}) - r_1 c_{1u}], \quad (2.17)$$

де c'_{2u} – колова складова абсолютної швидкості на виході з колеса при закручуванні потоку перед ним.

2.2 Принципові та конструктивні схеми виконання обладнання для тепловологісної обробки

Обладнання для тепловологісної обробки – герметична камера, яка обладнана потужним аеродинамічним нагрівачем роторного типу із робочим колесом спеціальної конструкції. Дане робоче колесо завдяки

конструктивному виконанню лопаток забезпечує відносно низький аеродинамічний коефіцієнт корисної дії [25, 26], що сприяє значним аеродинамічним втратам напору, тобто енергетичним втратам, які переходять у суттєве виділення – генерування теплової енергії. Таким чином, відбувається нагрів рециркулюючого повітря – тепловологісного середовища у в замкненому теплоізольованому контурі пропарювальної камери. В той же час, АНРТ постійно виконує рециркуляцію тепловологісного середовища в пропарювальній камері і забезпечує рівномірне нагрівання бетонних виробів, які розташовані в камері і підлягають тепловологісній обробці [31, 51, 59, 60, 61].

2.2.1 Пропарювальна камера із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з вертикальним розподіленням пароповітряного середовища

Конструктивне виконання пропарювальної камери із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з вертикальним розподіленням пароповітряного середовища представлено на рис 2.5.

Дана пропарювальна камера працює таким чином. Бетонні вироби на спеціальні візки та завантажують у робочу камеру через теплоізольовані двері. Пароповітряне середовище – гаряче вологе повітря – нагнітається АНРТ в циркуляційний канал. Пароповітряне середовище розподіляється частинами на малий і великий контури циркуляції, які утворені, відповідно всередині і зовні робочої камери 1. Малий контур циркуляції: рециркуляційний аеродинамічний нагрівач роторного типу 2 – простір між стінками робочої камери і циркуляційними направляючими екранами – робочі простори над формами виробів – жалюзійна ґратка 20 – всмоктуючий отвір рециркуляційного аеродинамічного нагрівача роторного типу 2. Великий контур циркуляції: рециркуляційний аеродинамічний нагрівач роторного типу 2 – простір між стінками робочої камери і циркуляційними направляючими екранами – робочі простори формами виробів – колектор каналів 7 та прямий контур 8 внутрішнього теплообмінника 6 – повітропроводи 9 і 10 – прямий повітряний контур 11 зовнішнього теплообмінника 12 – повітропровід

13 – повітропровід 21 – нагнітальний вентилятор 14 – повітропроводи 15, 16 та 17 – зворотній контур 18 і вихідний повітропровід 19 внутрішнього теплообмінника 6 – жалюзійна ґратка 20 – всмоктуючий отвір аеродинамічного нагрівача роторного типу 2. Зворотній ввідний контур 23 зовнішнього теплообмінника 12 типу «повітря-вода» з'єднаний із водогоном, в якому циркулює вода. Поміж повітропроводами 9 і 16 встановлено повітропровід 24 з дросельним пристроєм 25 із регульованим розміром прохідного отвору. До повітропроводу 17 під'єднано повітропровід 26 з дросельним пристроєм 27 із регульованим розміром прохідного отвору. Запірні засувки 28, 29, 30 та 31 відкриті, а засувка 32 закрыта. При цьому підвищення вологовмісту у циркулюючому пароповітряному середовищі в малому контурі, де і відбувається тепломасообмінний процес – тепловологісна обробка, здійснюють поступово заміною частини відпрацьованого пароповітряного середовища з великого контуру з більш високим вологовмістом. У великому контурі виконують тепловологісну обробку відділеної частини пароповітряного середовища, а саме: послідовно у дві стадії у внутрішньому та зовнішньому теплообмінниках підігрівають і зволожують його, з метою доведення параметрів пароповітряного середовища до значень потрібних для організації тепломасообмінних процесів у робочій камері пропарювальної камери, а потім, після двостадійного послідовного підігріву у внутрішньому теплообміннику та в замкненій камері рециркуляційного аеродинамічного нагрівача роторного типу, повертають його в теплоізольовану робочу камеру 1. Причому на першій стадії підігріву, відділену частину пароповітряного середовища підігрівають до температури близької до точки роси за рахунок передачі йому теплоти, що повертається по зворотному контуру 18 внутрішнього теплообмінника 6 після другої стадії підігріву у прямому контурі 11 зовнішнього теплообмінника 12, на який здійснюють конденсацію водяної пари, а конденсат видаляють із системи. На першій стадії підігріву відділеної частини пароповітряного середовища його нагрівають у зворотному контурі 18 внутрішнього теплообмінника 6 за рахунок відібраної теплоти від цієї відділеної частини відпрацьованого пароповітряного середовища на першій стадії його підігріву в прямому контурі цього ж теплообмінника, а на другій стадії його змішують з основним потоком

пароповітряного середовища, від якого постійно відбирають таку ж його масову частину на підігрів, і весь потік нагрівають за рахунок енергії підведеної на привід аеродинамічного нагрівача роторного типу 2 від зовнішнього електродвигуна 3 або за рахунок тепловіддачі теплообмінників 39 і 40, а потім направляють в пропарювальну робочу камеру 1.

Для збалансування кількості сконденсованої із відпрацьованого пароповітряного середовища води заміщують його частину зі зниженим вологовмістом на таку ж частину з підвищеним вологовмістом, який беруть із зовні (дозовану кількість води з водогону або із конденсатовідвідника).

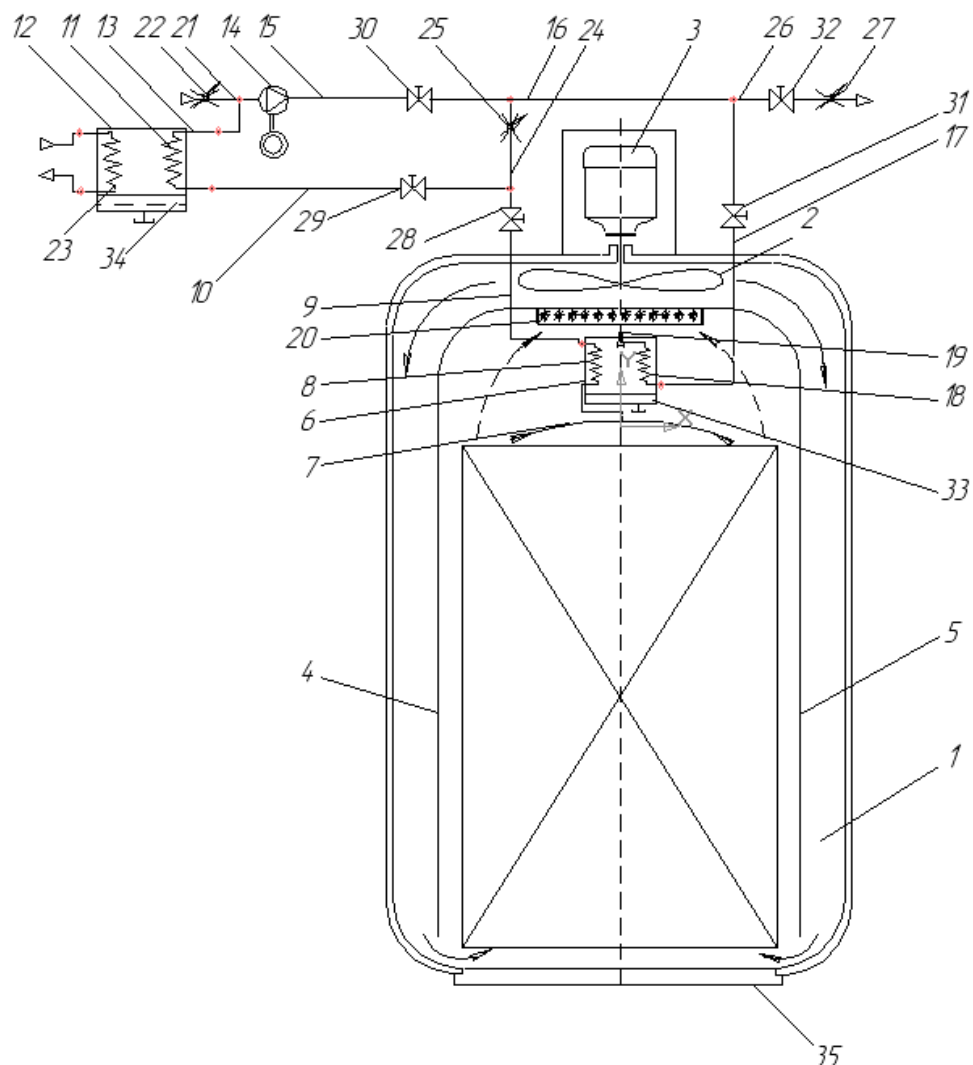


Рис. 2.5. Схема конструктивного виконання пропарювальної камери із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з вертикальним розподіленням пароповітряного середовища

2.2.2 Пропарювальна камера із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з горизонтальним розподіленням пароповітряного середовища

Тепловологісну обробку бетонних виробів в пропарювальній камери із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з горизонтальним розподіленням пароповітряного середовища (рис. 2.6) здійснюють шляхом виконання наступних операцій [62, 63, 64]. Сформовані бетонні вироби укладають в металеву форму, ущільнюють, розташовують на решітчасті полиці вертикальних стелажів 7, теплоізовану робочу камеру 1 щільно зачиняють (герметизують), виключаючи зв'язок внутрішньої порожнини із зовнішнім атмосферним середовищем. Вмикають електродвигун 4, який приводить в дію аеродинамічний нагрівач роторного типу 3, в результаті рециркуляції повітряного середовища і внаслідок аеродинамічних втрат в ньому відбувається нагрів потоків теплового агенту.

Вихрові потоки теплового агента від аеродинамічного нагрівача роторного типу 3 потрапляють в замкнуту камеру 2, з якої горизонтальними повздовжніми повітропроводами 9 через направляючі циркуляційні екрани 5 надходять до вертикальних стелажів 7 з решітчастими полицями. Під час проходження поміж решітчастих полиць вертикальних стелажів 7 тепловий агент передає тепло, вологу і рівномірно розігріває будівельні вироби, які розміщені на них. Потім охолоджений тепловий агент через жалюзійну ґратку 8 потрапляє у всмоктуючий отвір аеродинамічний нагрівач роторного типу 3. Таким чином, здійснюється рециркуляція теплового агенту.

В процесі нагріву будівельних виробів відбувається видалення вологи з їх поверхні та внутрішнього об'єму в повітряне середовище теплоізованої робочої камери 1. В окремих випадках, коли всередині будівельних виробів при нагріванні відбуватимуться процеси хімічної чи фізичної модифікації матеріалів, що пов'язані із поглинанням вологи (наприклад, процеси гідратації цементу у бетонних виробках), то для забезпечення необхідного тепловологісного балансу в повітряному середовищі теплоізованої робочої камери 1 необхідно додатково подавати воду. Для цього над аеродинамічним нагрівачем роторного типу 3 відбувається розбризкування води через

дистанційно керовані розпилювальні форсунки 6. Вода під дією високої температури перетворюється в пару і разом із теплим повітрям рециркулює всередині теплоізольованої робочої камери 1, створюючи пароповітряне середовище, яке здійснює подальше нагрівання і зволоження поверхні та внутрішнього об'єму виробу. В разі необхідності дотримання необхідного, за технологічними вимогами, тепловологісного режиму процеси подачі води періодично повторюються. Регулюванням положень дросель-клапанів 10, а також площі прохідних отворів жалюзійної ґратки 8 і витратами води через форсунки 6 досягають різних температурних режимів тепловологісної обробки будівельних виробів у теплоізольованій робочій камері 1.

За рахунок рециркуляції теплового агенту температура пароповітряного середовища рівномірно підвищується від 18°C до 90°C впродовж 4,0 – 4,5 годин. Після досягнення даної температури будівельні вироби витримуються при температурі 80°C – 90°C впродовж 10 – 12 годин, а потім вмикаються теплообмінний апарат 15 який охолоджує повітряне середовище в пропарювальній камері й оброблювані будівельні вироби до температури навколишнього середовища. Після охолодження здійснюється розгерметизація теплоізольованої робочої камери 1, готовий будівельний виріб вилучається назовні. Завантажується новий і технологічний процес тепловологісної обробки повторюється.

Під час охолодження частину енергії можна вилучити за рахунок тепломасообміну в теплообмінному апараті 15 і використати на нагрівання води необхідної для подальшого створення теплового агенту в теплоізольованій робочій камері 1 та додаткового зволоження будівельних виробів.

Теплова енергія, яка накопичується пароповітряною сумішшю в просторі теплоізольованої робочої камери 1, утворюється в результаті нагріву повітряного середовища за допомогою аеродинамічного нагрівача роторного типу 3 та відбору частини теплової енергії від води, що нагнітається через дистанційно керовані розпилювальні форсунки 6. З метою енергозбереження, як воду для зволоження будівельних виробів (для дистанційно керовані розпилювальні форсунки 6), або інших технологічних потреб, застосовують зібраний конденсат, який випадає у нижній частині пропарювальної камери і має залишкову температуру.

Варіантами виконання пропарювальної камери можуть бути конструктивні рішення, коли робочий об'єм герметичної теплоізованої робочої камери складають з однієї, двох або більше окремих секцій, які поєднані в контурах циркуляції пароповітряного середовища. Такі конструктивні рішення розширюють функціональні пропарювальної камери.

Конструктивне виконання пропарювальної камери із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з горизонтальним розподіленням пароповітряного середовища представлено на рис 2.6.

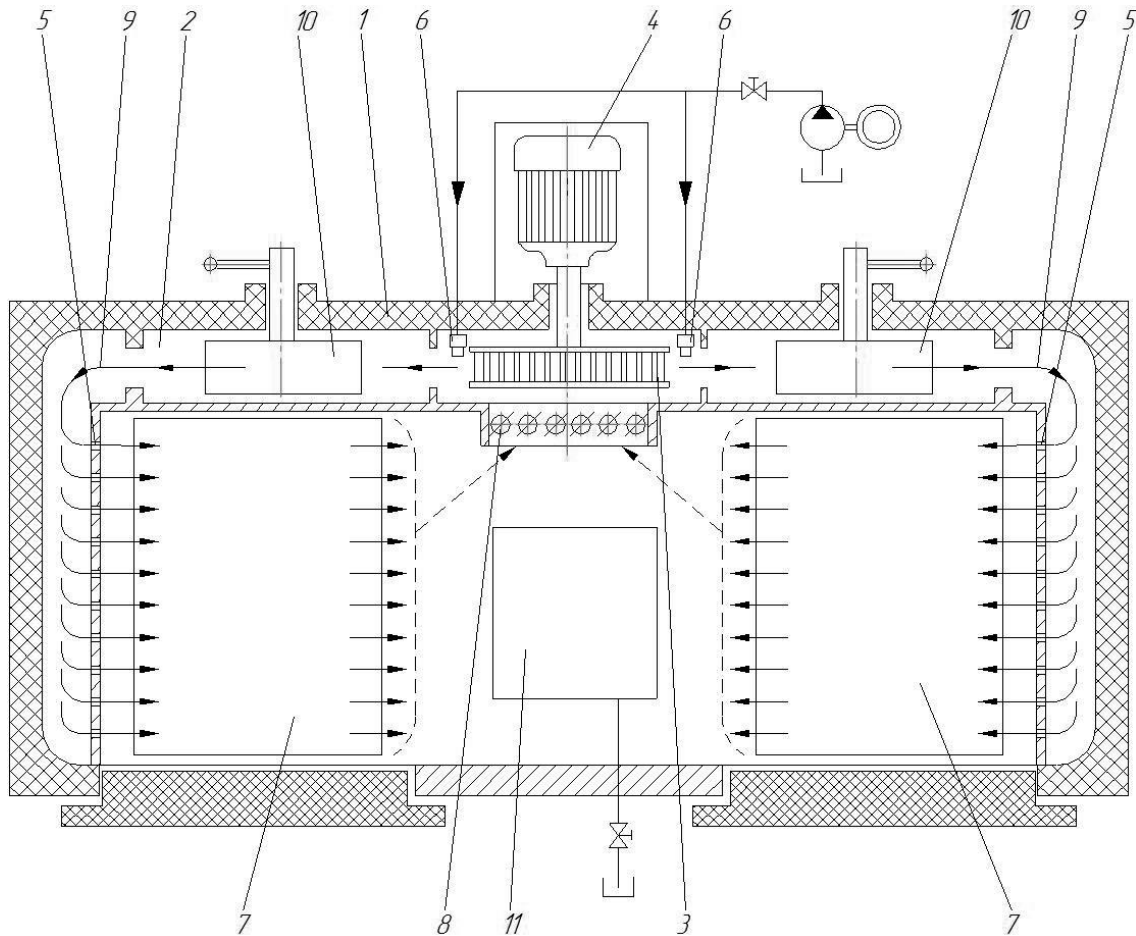


Рис. 2.6. Схема конструктивного виконання пропарювальної камери із аеродинамічним нагрівачем роторного типу з горизонтальним розподіленням пароповітряного середовища

2.2.3 Автоклавна установка тепловологісної обробки.

Автоклавна установка тепловологісної обробки рис. 2.7 працює так [30, 31, 30]. Візок 4 з встановленим на ньому виробом 5, який підлягає тепловій обробці, транспортують по рейкових напрямних 2 в

робочу камеру 8 теплоізолюваного корпусу 1. Приводиться в дію аеродинамічний нагрівач роторного типу 9, в результаті рециркуляції повітряного потоку і внаслідок аеродинамічних втрат в ньому відбувається нагрів повітряного середовища. Потік гарячого повітря рециркулює в робочій камері 8, яка обмежена нижнім 6 та верхнім 7 тепловими екранами, та передає тепло елементам робочої камери 8 і рівномірно розігріває виріб 5, що розміщений на візку 4.

Тиск у повітряному середовищі в теплоізолюваному корпусі 1 створюється компресором 13 з пневморесивером 14. Стиснене повітря, проходячи через редуційний клапан 12 по трубопроводу 11, подається в робочу камеру 8. В процесі нагрівання виробу 5 відбувається видалення вологи з його поверхні та із внутрішнього об'єму в повітряне середовище робочої камери 8. В окремих випадках, коли всередині виробу при нагріванні відбуватимуться процеси хімічної чи фізичної модифікації матеріалів, що пов'язані із поглинанням вологи (наприклад, процеси гідратації цементу у бетонних виробках), то для забезпечення необхідного тепловологісного балансу в повітряному середовищі робочої камери 8 необхідно додатково подавати воду. Для цього над аеродинамічним нагрівачем роторного типу 9 відбувається розбризкування води через форсунки 10. Вода під дією високої температури перетворюється в пару, яка разом із теплим повітрям рециркулює всередині робочої камери 8, створюючи відповідне за тиском і температурою пароповітряне середовище, що здійснює подальше нагрівання і зволоження поверхні та внутрішнього об'єму виробу 5. В разі потреби дотримання необхідного за технологічними вимогами тепловологісного режиму процеси подачі води періодично повторюються.

Виріб 5 витримується певний час при заданому рівні температури, вологості і тиску. Після закінчення технологічного процесу аеродинамічний нагрівач роторного типу 9 зупиняється і вмикається теплообмінник 3, який охолоджує повітря в автоклавній установці. Здійснюється розгерметизація робочої камери 8, внаслідок відкриття вентилі 16, що трубопроводом 15 з'єднаний із атмосферою. Сконденсована рідина видаляється з автоклавної установки через вентиль 17. Після охолодження робоча камера 8 відкривається і візок 4 з встановленим на ньому виробом 5 вилучається назовні.

Завантажується новий виріб і технологічний процес тепловологісної обробки повторюється.

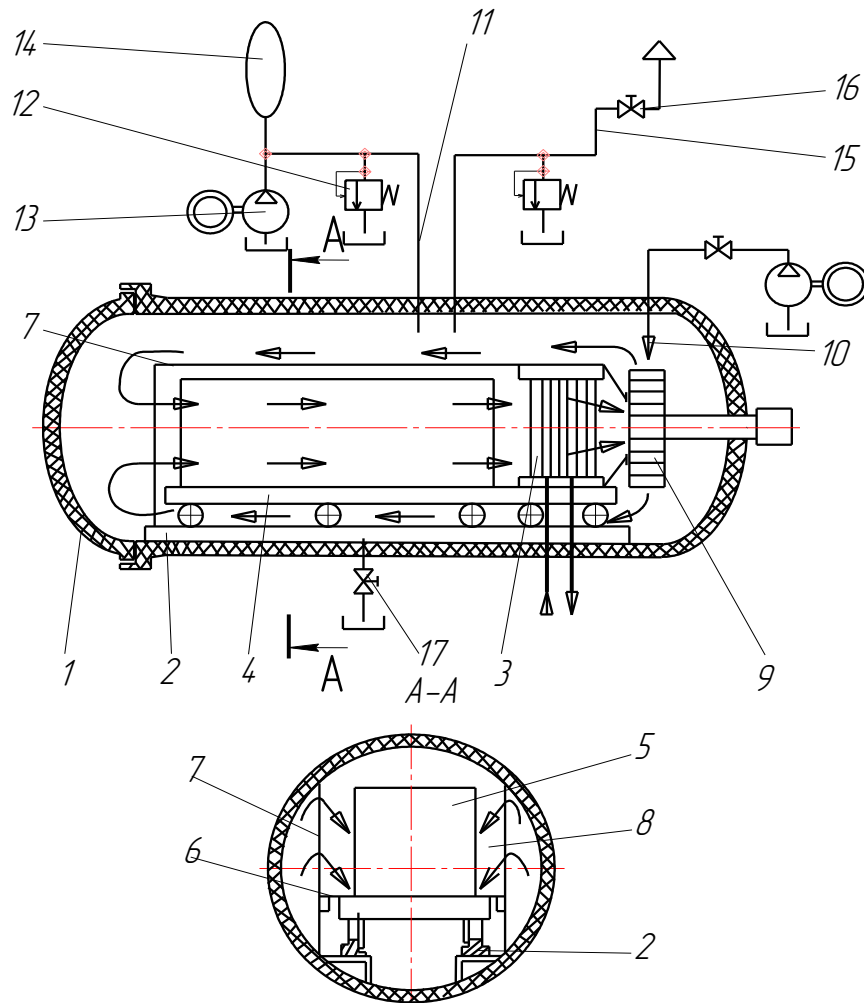


Рис. 2.7. Автоклавна установка тепловологісної обробки

Під час охолодження частина енергії може бути вилучена за рахунок тепломасообміну в утилізаторі теплової енергії і використана на нагрівання води необхідної для подальшого створення пароповітряного середовища в робочій камері та додаткового зволоження виробів.

Теплова енергія, що накопичується у пароповітряному об'ємі робочої камери, утворюється в результаті нагріву цього середовища за допомогою аеродинамічного нагрівача та відбору частини теплової енергії від води, що нагнітається через форсунки. З метою енергозбереження, як воду для зволоження, для форсунок застосовують зібраний конденсат, який випадає у нижній частині

камери і має залишкову температуру. Тому раціональним є його подальше застосування, замість подачі нових порцій холодної води із мереж водопостачання, яку потім знову прийдеться розігрівати в робочій камері, або за її межами, до стану перетворення у пару із відбором суттєвої частки теплової енергії від основного теплогенеруючого агрегату – аеродинамічного нагрівача.

Таким чином, для наступних теоретичних та експериментальних досліджень приймаємо представлені на рис. 2.5, 2.6 та 2.7 конструктивні схеми обладнання для тепловологісної обробки бетонних виробів.

2.3 Вибір об'єкту дослідження

Аналіз принципів та конструктивних схем виконання обладнання для тепловологісної обробки, виконаний в 1 розділі та підрозділі 2.2 показав, що здійснення тепловологісної обробки бетонних виробів можливе із розташуванням основного теплогенеруючого пристрою безпосередньо в теплоізовованому корпусі робочої камери [30, 31, 32, 33, 34]. Як основний теплогенеруючий пристрій використовують аеродинамічний нагрівач роторного типу. АНРТ здійснює безперервну рециркуляцію повітряного потоку і внаслідок аеродинамічних втрат в ньому відбувається постійний нагрів повітряного середовища у замкненому просторі теплоізовованої робочої камери (рис. 2.5, 2.6, 2.7). Потік гарячого повітря, що здійснює рециркуляцію в робочій камері, передає тепло елементам робочої камери і рівномірно розігріває виріб. В процесі нагріву виробу відбувається видалення вологи з його поверхні та із внутрішнього об'єму тіла виробу в повітряне середовище робочої камери. Для забезпечення необхідного тепловологісного балансу в повітряному середовищі робочої камери додатково подається вода. Для цього над аеродинамічним нагрівачем відбувається розбризкування води через форсунки. Вода під дією високої температури перетворюється в пару і разом із теплим повітрям рециркулює всередині робочої камери, створюючи відповідне за тиском і температурою пароповітряне середовище, яке здійснює подальше нагрівання і зволоження поверхні та внутрішнього

об'єму виробу. Зволоження ще не затверділого відкритого шару бетону викликає переміщення вологи до центру виробу, а іноді й незначне його набухання. Паралельно з цим в бетоні спостерігаються контракційні явища, що приводять до зменшення об'єму і сприяють міграції води всередину бетону. Температурний градієнт, який виникає під час тепловологісної обробки призводить до виникнення температурної напруги, оскільки зовнішні більш нагріті шари збільшуються в об'ємі більше внутрішніх. Вплив температурних градієнтів під час розігрівання особливо великий (оскільки структура бетонного виробу ще не сформувалася, а міцність його невелика) і проявляється в мікроруйнуваннях структури цементного каменя і на межі його контакту із заповнювачами [1, 2]. На цьому етапі, особливо при швидкому нагріванні виробу, може виникнути значна напруга, в результаті якої утворюються тріщини, а також відбувається порушення контактів між цементним каменем і заповнювачем. Тому й важливо забезпечити поступове рівномірне прогрівання виробів незалежно від місця розташування виробу в камері.

Як видно з рис. 2.5 – 2.7 залежно від розташування АНРТ, в теплоізолюваному корпусі робочої камери, потоки теплового агенту будуть розподілятися горизонтально або вертикально в робочому просторі камери. Дослідивши рівномірність нагріву бетонних виробів під час тепловологісної обробки [36, 37] нами було отримано, що горизонтальне розподілення теплового агенту (рис. 2.6, 2.7) забезпечує рівномірний нагрів всіх виробів незалежно від висоти розміщення, на відміну від тепловологісної обробки в камері з вертикальним розподіленням теплового агенту (рис. 2.5) вироби прогріваються нерівномірно залежно від висоти розташування. Оскільки гаряча пара легше за повітря і має більш високу температуру, вона накопичується у верхній частині камери, а нижче розташовується тепловий агент з поступово зменшеною концентрацією водяної пари. В зв'язку з цим, по висоті камери спостерігається перепад температур, який призводить до нерівномірного прогрівання бетонних виробів та дефектів в їх структурі. Для усунення цього недоліку доцільніше використовувати камери з інтенсивною примусовою циркуляцією теплоносія та горизонтальним розподіленням потоків теплового агенту, які забезпечать високі показники теплообміну і рівномірний нагрів виробів.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ В ПРОПАРЮВАЛЬНИХ КАМЕРАХ

3.1 Основні обмеження і припущення математичної моделі процесу тепловологісної обробки

Для побудови математичної моделі процесу тепловологісної обробки розглянемо пропарювальну камеру можна як систему, в якій її складові частини взаємодіють між собою: пароповітряний об'єм, вироби, форми виробів, корпус камери.

При створенні математичної моделі динаміки робочого процесу тепловологісної обробки будівельних виробів в пропарювальній камері із аеродинамічним нагрівом було прийнято наступні припущення [38 50]:

- пароповітряний об'єм камери є об'єктом із зосередженими параметрами (рис. 3.1);

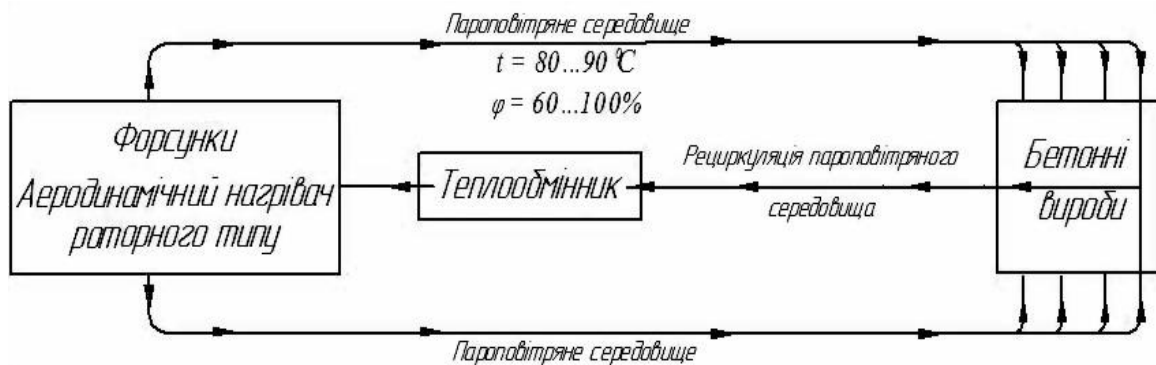


Рис. 3.1. Структурна схема процесу тепловологісної обробки в пропарювальній камері

- теплофізичні характеристики та тепловий ефект фізико-хімічних перетворень при твердінні виробу залежать від температури і ступеня гідратації цементу (рис. 3.1 [2, 6. 26]);

- граничні ефекти не впливають на процеси розповсюдження тепла у виробах. Тепло в них розповсюджується тільки за однією просторовою координатою (рис. 3.2 та рис. 3.4);

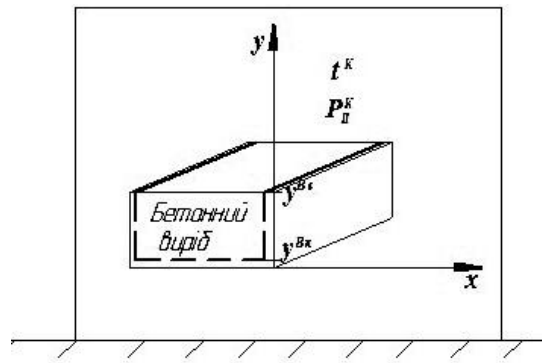


Рис. 3.2. Схема розповсюдження тепла у бетонних виробах

- термічний опір, який створює плівка конденсату при конденсації пари нескінченно малий порівняно з опором дифузійного шару пароповітряної суміші. Наявність плівки конденсату та її товщина не впливає на процеси тепло масообміну [6, 23, 38];

- тепло у виробах поширюється в основному за рахунок теплопровідності, причому, кількість теплоти, яка віддається нагрітими тілами стікаючому конденсату, є нескінченно малою порівняно з теплом, яке віддається пароповітряним середовищем;

- виріб – однорідне та капілярно-пористе тіло: арматура і грубодисперсні заповнювачі не впливають на розповсюдження тепла за просторовими координатами;

- деформація об'єму виробу, що пов'язана зі зміною температури, є досить незначною в порівнянні з вихідним об'ємом;

- закономірності процесу розповсюдження тепла є однаковими для всіх виробів.

Враховуючи дані припущення пропарювальна камера розглядається як складна система (рис. 2.6), взаємодія підсистем якої між собою та з підсистемами зовнішнього середовища зображено на рисунку 3.3.

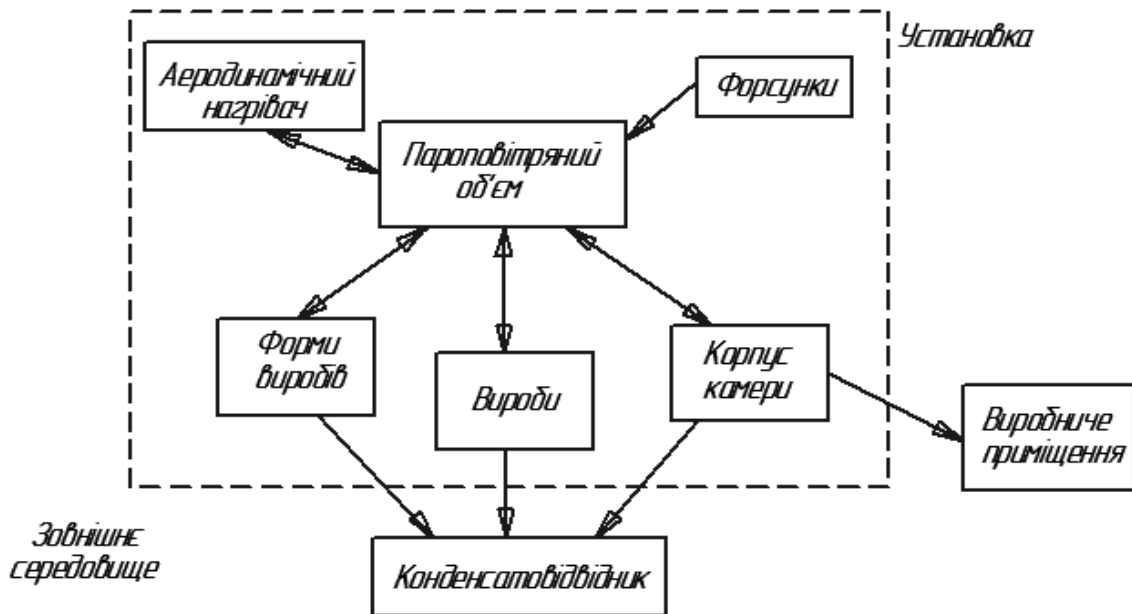


Рис. 3.3 – Схема взаємодії теплових потоків в пропарювальній камері

У просторі робочої камери в результаті нагріву, за допомогою аеродинамічного нагрівача, повітря в об'ємі робочої камери та крапель води, яка подається із-зовні через форсунки, утворюється пароповітряне середовище. Потік гарячого та вологого повітря здійснює рециркуляцію, під час якої передає тепло корпусу камери, формам виробів та рівномірно розігріває вироби.

Залежно від різниці температур між пароповітряним середовищем камери і зовнішньою поверхнею форм, пароповітряна середовище може нагрівати або охолоджувати поверхню форм. Таким чином, відбувається взаємодія між пароповітряним середовищем та формами виробів.

Залежно від параметрів пароповітряного середовища і температури відкритої поверхні виробів, вільна волога, яка міститься в бетоні, може випаровуватись з поверхні бетонних виробів або конденсуватись на їх відкритій поверхні (взаємодія між пароповітряним середовищем і виробами).

Частина тепла пароповітряного середовища втрачається під час видалення конденсату через конденсатівідвідник, а також за рахунок тепловтрат через корпус камери.

3.2 Математичне моделювання процесів, що відбуваються у виробках

3.2.1 Математична модель процесів тепломасообміну у виробках

Процеси тепломасообміну, які відбуваються в капілярно пористих матеріалах до яких відносяться бетонні вироби, детально описані системою диференційних рівнянь в частинних похідних в працях [6, 23, 53]. На формування бетонних виробів впливають наступні чинники [6]: тепломасообмін між виробом і пароповітряною сумішшю, формами виробів; тепловиділення при гідратації цементу.

Згідно вище викладеного та припущень прийнятих в підрозділі 3.1 в процесі тепломасообміну для поверхні бетонного виробу можливі наступні випадки:

1) відбувається нагрів поверхні бетонних виробів за рахунок теплових потоків які викликані відповідно конвективним перенесенням тепла та конденсацією пари. Даний випадок виникає коли температура пароповітряного середовища і тиск пари в установці більше відповідно температури поверхні бетонних виробів йі тиску пари при даній температурі, рис. 3.4, а);

2) відбувається одночасно конвективне нагрівання і охолодження за рахунок випаровування вільної вологи з відкритої поверхні бетону, при цьому:

- тепловий потік, що викликаний конвективним перенесенням тепла більше теплового потоку, викликаного випаровуванням води;
- потік $q_{кон}^{Be}$ менше або дорівнює величині $q_{вип}^{Be}$.

Даний випадок виникає коли температура пароповітряного середовища в камері більше температури поверхні бетонних виробів, при цьому парціальний тиск в камері менше або дорівнює тиску пари даній температурі, рис. 3.4, б, в);

3) відбувається охолодження поверхні бетонних виробів за рахунок конвективної передачі тепла в пароповітряне середовище і випаровування вологи. При цьому температура пароповітряного середовища менша або дорівнює температурі поверхні бетонних виробів, рис. 3.4 г).

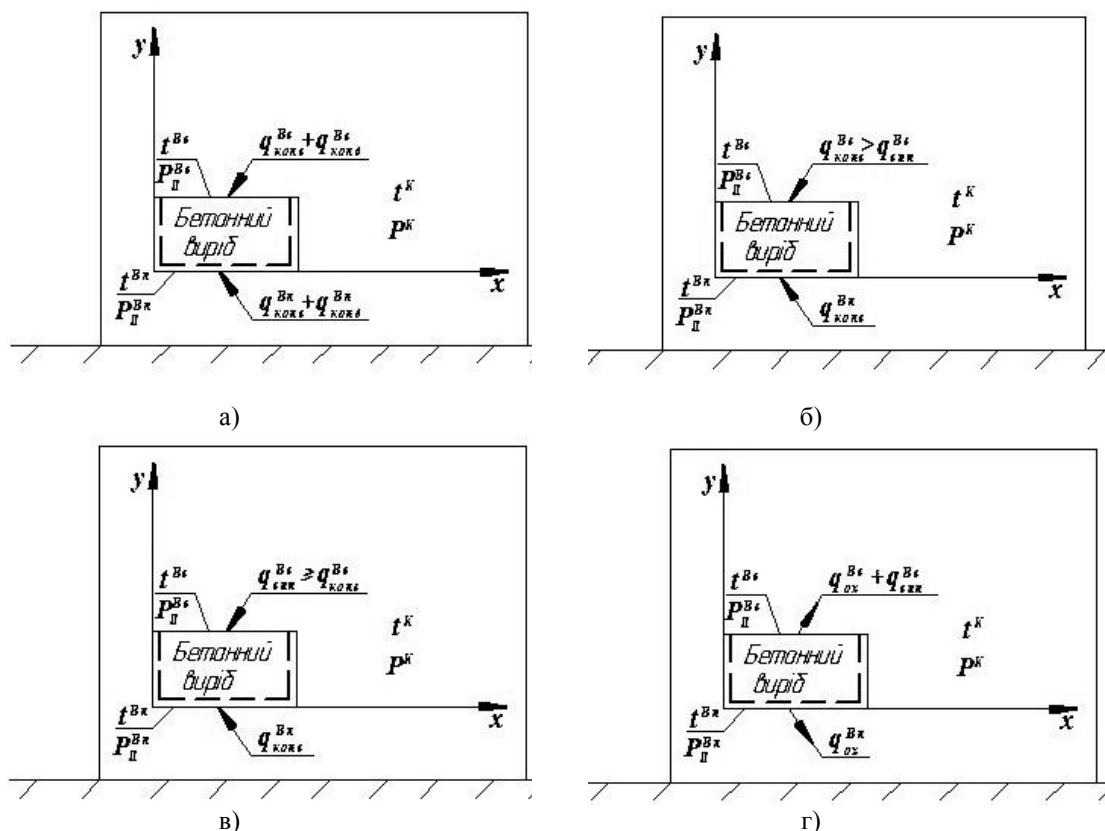


Рис. 3.4. Схеми випадків процесів тепломасообміну для верхньої та нижньої поверхонь бетонних виробів

Для побудови математичної моделі процесу поширення теплоти в бетонних виробах достатньо одного рівняння для визначення зміни температури в будь-якому виробі [23] з початковими умовами:

$$t^B = t^K = const, \quad y^{Bн} < y < y^{Bε}, \quad \tau < 0$$

$$\rho^B c^B \frac{dt^B}{d\tau} = \frac{d}{dy} \left(\lambda^B \frac{dt^B}{dy} \right) + q^B \quad (3.1)$$

де t^B – температура бетонних виробів, $^{\circ}\text{C}$;

t^K – температура в пропарювальній камері $5 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, залежить від умов у виробничому приміщенні [53];

ρ^B – густина бетонних виробів, кг/м^3 ;

c^B – теплоємність бетонних виробів, $\text{Дж/кг } ^{\circ}\text{C}$;

λ^B – коефіцієнт теплопровідності бетонних виробів, $\text{Дж/кг } ^{\circ}\text{C}$;

q^B – кількість теплоти, яка виділяється бетонними виробами за одиницю часу в одиниці об'єму, Дж/кг³ с.

Коефіцієнт теплопровідності λ^B та теплоємності c^B твердіючого бетонного виробу залежать від виду, кількості та фракційного складу в'язучого та заповнювачів, температури матеріалу, процесу структуроутворення цементного каменя [6].

Згідно закону збереження енергії, для наведених вище випадків тепломасообміну запишемо граничні умови для верхньої поверхні бетонних виробів:

$$\begin{aligned}\lambda^B \frac{dt^B}{dy} &= q_{\text{кон}}^{B\epsilon} + q_{\text{конд}}^{B\epsilon}, \quad y = y^{B\epsilon}, \quad \tau \geq 0, \quad t^K > t^{B\epsilon}, \quad P_{\Pi}^K > P_{\Pi}^{B\epsilon}, \\ \lambda^B \frac{dt^B}{dy} &= q_{\text{кон}}^{B\epsilon} - q_{\text{вин}}^{B\epsilon}, \quad y = y^{B\epsilon}, \quad \tau \geq 0, \quad t^K > t^{B\epsilon}, \quad P_{\Pi}^K \leq P_{\Pi}^{B\epsilon}, \\ \lambda^B \frac{dt^B}{dy} &= -q_{\text{ох}}^{B\epsilon} - q_{\text{вин}}^{B\epsilon}, \quad y = y^{B\epsilon}, \quad \tau \geq 0, \quad t^K \leq t^{B\epsilon},\end{aligned}\tag{3.2}$$

де $q_{\text{кон}}^{B\epsilon} = \alpha_{\text{кон}}^{B\epsilon} (t^K - t^{B\epsilon})$ – кількість теплоти, яка передається за одиницю часу верхній поверхні виробу за рахунок конвекції, Дж/м² с;

$\alpha_{\text{кон}}^{B\epsilon}$ – коефіцієнт тепловіддачі верхньої поверхні виробу за рахунок конвекції, Дж/м² с °С;

$t^{B\epsilon} = t^B(y^{B\epsilon})$ – температура верхньої поверхні виробу, °С;

$q_{\text{конд}}^{B\epsilon} = g_{\Pi}^{B\epsilon} r_{\Pi}^{B\epsilon}$ – кількість теплоти, яка передається за одиницю часу верхній поверхні виробу за рахунок конденсації пари, Дж/м² с;

$r_{\Pi}^{B\epsilon}$ – теплота пароутворення пари при температурі $t^{B\epsilon}$, Дж/кг;

$g_{\Pi}^{B\epsilon} = \beta_{\text{конд}}^{B\epsilon} (P_{\Pi}^K - P_{\Pi}^{B\epsilon})$ – витрати сконденсованої пари на одиниці площі верхньої поверхні виробу, кг/м² с;

$\beta_{\text{конд}}^{B\epsilon}$ – коефіцієнт масообміну при конденсації пари на верхній поверхні виробу, кг/м² с Па;

P_{Π}^K – тиск пари в пропарювальній камері, Па;

$P_{\Pi}^{B\epsilon}$ – тиск пари при температурі $t^{B\epsilon}$, Па;

$q_{ox}^{Be} = \alpha_{ox}^{Be} (t^{Be} - t^K)$ – тепловий потік утворений в результаті перенесення теплоти конвекцією від верхньої поверхні виробу в пароповітряне середовище, Дж/м² с;

$q_{вин}^{Be} = r_{\Pi}^{Be} g_p^{Be}$ – тепловий потік утворений в результаті випаровування води з виробу, Дж/м² с;

g_p^{Be} – витрата рідини, яка випаровується з верхньої поверхні виробу, кг/м² с. Волога випаровується з відкритої поверхні бетонного виробу повільніше, ніж з поверхні вільної води, оскільки рідка фаза в ньому представлена складним мінеральним розчином. Питому витрату води, яка випарувалась з відкритої поверхні бетонного виробу можна знайти з наступної залежності, згідно [54]:

$$g_p^{Be} = \begin{cases} 0, & \xi \cdot P_{\Pi}^{Be} \leq P_{\Pi}^K \\ \beta_{вин}^{Be} (\xi \cdot P_{\Pi}^{Be} - P_{\Pi}^K), & \xi \cdot P_{\Pi}^{Be} > P_{\Pi}^K \end{cases},$$

$$\xi = 0,091 \cdot 10^{\frac{293}{t^{Be} + 273}}$$

Якщо у залежність (3.2) ввести узагальнену густину теплового потоку q_{Σ}^{Be} , Дж/м² с, отримаємо:

$$q_{\Sigma}^{Be} = \begin{cases} q_{кон}^{Be} + g_{кон}^{Be} r_{\Pi}^{Be}, & t^K > t^{Be}, P_{\Pi}^K > P_{\Pi}^{Be} \\ q_{кон}^{Be} - q_{вин}^{Be}, & t^K > t^{Be}, P_{\Pi}^K \leq P_{\Pi}^{Be} \\ -q_{вин}^{Be} - q_{ox}^{Be}, & t^K \leq t^{Be} \end{cases}. \quad (3.3)$$

Після перетворень залежностей (3.2) та (3.3) отримаємо:

$$\lambda^B \frac{dt^B}{dy} = q_{\Sigma}^{Be}, \quad y = y^{Be}, \quad \tau \geq 0. \quad (3.4)$$

Згідно закону збереження енергії, для наведених вище випадків тепломасообміну запишемо граничні умови для нижньої поверхні бетонних виробів:

$$\begin{aligned}
\lambda^B \frac{dt^B}{dy} &= q_{\text{кон}}^{Bн} + q_{\text{конд}}^{Bн}, \quad y = y^{Bн}, \quad \tau \geq 0, \quad t^K > t^{Bн}, \quad P_{\Pi}^K > P_{\Pi}^{Bн}, \\
\lambda^B \frac{dt^B}{dy} &= q_{\text{кон}}^{Bн}, \quad y = y^{Bн}, \quad \tau \geq 0, \quad t^K > t^{Bн}, \quad P_{\Pi}^K \leq P_{\Pi}^{Bн}, \\
\lambda^B \frac{dt^B}{dy} &= -q_{\text{ох}}^{Bн}, \quad y = y^{Bн}, \quad \tau \geq 0, \quad t^K \leq t^{Bн},
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

де $q_{\text{кон}}^{Bн} = \alpha_{\text{кон}}^{Bн} (t^K - t^{Bн})$ – кількість теплоти, яка передається за одиницю часу нижній поверхні виробу за рахунок конвекції, Дж/м² с;

$\alpha_{\text{кон}}^{Bн}$ – коефіцієнт тепловіддачі нижньої поверхні виробу за рахунок конвекції, Дж/м² с °С;

$t^{Bн} = t^B(y^{Bн})$ – температура нижньої поверхні виробу, °С;

$q_{\text{конд}}^{Bн} = g_{\text{конд}}^{Bн} r_{\Pi}^{Bн}$ – кількість теплоти, яка передається за одиницю часу нижній поверхні виробу за рахунок конденсації пари, Дж/м² с;

$r_{\Pi}^{Bн}$ – теплота пароутворення пари при температурі $t^{Bн}$, Дж/кг;

$g_{\Pi}^{Bн} = \beta_{\text{конд}}^{Bн} (P_{\Pi}^K - P_{\Pi}^{Bн})$ – витрати сконденсованої пари на одиниці нижньої поверхні виробу, кг/м² с;

$\beta_{\text{конд}}^{Bн}$ – коефіцієнт масообміну при конденсації пари на нижній поверхні виробу, кг/м² с Па;

P_{Π}^K – тиск пари в пропарювальній камері, Па;

$P_{\Pi}^{Bн}$ – тиск пари при температурі $t^{Bн}$, Па;

$q_{\text{ох}}^{Bн} = \alpha_{\text{ох}}^{Bн} (t^{Bн} - t^K)$ – тепловий потік утворений в результаті перенесення теплоти конвекцією від нижньої поверхні виробу в пароповітряне середовище, Дж/м² с;

Якщо у залежність (3.5) ввести узагальнений тепловий потік $q_{\Sigma}^{Bн}$, Дж/м² с, отримаємо:

$$q_{\Sigma}^{Bн} = \begin{cases} q_{\text{кон}}^{Bн} + g_{\text{конд}}^{Bн} r_{\Pi}^{Bн}, & t^K > t^{Bн}, \quad P_{\Pi}^K > P_{\Pi}^{Bн} \\ q_{\text{кон}}^{Bн}, & t^K > t^{Bн}, \quad P_{\Pi}^K \leq P_{\Pi}^{Bн} \\ q_{\text{ох}}^{Bн}, & t^K \leq t^{Bн} \end{cases}.
\tag{3.6}$$

Після перетворень залежностей (3.5) та (3.6) отримаємо:

$$\lambda^B \frac{dt^B}{dy} = q_{\Sigma}^{B_H}, \quad y = y^{B_H}, \quad \tau \geq 0. \quad (3.7)$$

Коефіцієнти тепловідачі та коефіцієнти масообміну – основні фактори, які визначають інтенсивність процесу тепловологісної обробки бетонних виробів в пропарювальній камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу. Значення цих коефіцієнтів залежать від теплофізичних властивостей та гідродинамічних параметрів пароповітряної суміші, геометричної форми й розмірів, стану поверхні теплообміну, температурного напору тощо [6, 23, 53].

3.2.2 Математична модель гідратації цементу

Теплота гідратації є позитивною складовою в загальному тепловому балансі, необхідному для підтримання режиму твердіння бетонних виробів. Її правильне використання визначає економічність способів витримки виробів. Характер тепловиділення пов'язаний з гідратацією цементу. Згідно [23], кількість теплоти, яка виділяється при твердненні бетонних виробів, буде пропорційною масі продуктів гідратації.

При створенні математичної моделі гідратації цементу, з врахуванням викладеного в першому розділі, прийнято наступні припущення:

- при гідратації вода може знаходитися в хімічно зв'язаному, активному і пасивному стані. Активна – вода, здатна в даний момент вступати в реакцію з цементом, що не прореагував. Пасивна включає воду, що знаходиться в області цементу, що прореагував, і що міститься в порах поза цементними зернами;
- пасивна вода може проникати в зону, що контактує з не прореагувавшим цементом, і стає активною. Зворотний перехід води з активного стану в пасивний неможливий;

- бетонний розчин розглядається у вигляді закритої системи. Кількість води, що випаровується, в зовнішнє середовище є нескінченно малою в порівнянні з кількістю пасивної води.

Перед виведенням математичної моделі гідратації цементу введемо наступні позначення:

$m_{\text{ц}}^0$ – початковий вміст цементу у бетонному виробі, кг;

$m_{\text{ц}}^x$ – кількість цементу, що вступив в реакцію гідратації з водою, кг;

$m_{\text{ц}}^6$ – кількість цементу, що не прореагував з водою, кг;

$m_{\text{в}}^0$ – початковий вміст води у бетонному виробі, кг;

$m_{\text{в}}^x$ – кількість хімічно зв'язаної води, кг;

$m_{\text{в}}^n$ – кількість води в пасивному стані, кг;

$m_{\text{в}}^a$ – кількість води в активному стані, кг.

Процес гідратації поділяється [23, 53] на початковий та основний періоди. В початковий період гідратація відбувається з прискоренням і до завершення періоду її швидкість стає максимальною. При температурному максимумі відбувається перекристалізація гелеподібних новоутворень в кристалічні фази. Протягом цього періоду працює дифузійний механізм гідратації. Перенесення речовини здійснюється конвекцією та дифузією, за рахунок екзотермічного ефекту при гідратації його складових. В цей час відбувається формування структури майбутнього бетону. Рухома суміш поступово втрачає свою пластичність. Основний період характеризується вповільненням процесу гідратації й тепловиділення. Швидкість гідратації та тепловиділення під час основного періоду визначається вже не дифузією, а кінетикою хімічної взаємодії.

В [6, 23] наведено механізм зміни фізико-механічних властивостей за рахунок переходу рідкої фази в тверду:

1. Період розмноження. В початковий період відбувається збільшення числа центрів кристалізації. Зародки розростаються і зрощуються між собою що викликає збільшення в'язкості системи.

2. Фазовий перехід. Подальше збільшення центрів кристалізації призводить до виникнення кристалічного масиву. Критичність даного періоду умовно позначається як момент "твердіння". З цього моменту

відбувається повне заповнення системи кристалічною фазою, після чого процес твердіння завершується.

Хемо-кінетична модель описується рівняннями фізичної хімії. Передбачається, що реакція гідратації задовольняє рівняння витрати мас в його загальному вигляді. Тоді на підставі закону збереження мас кількість цементу що вступив в реакцію гідратації з водою визначатиметься у вигляді:

$$m_u^x = m_u^0 - m_u^e \quad (3.8)$$

Кількість цементу m_u^e визначається з моделі [63] побудованої на базі рівнянь формальної кінетики:

$$\frac{dm_u^e}{d\tau} = -a_x \cdot \exp\left(\frac{-E_x}{R(t_{cp}^B + 273)}\right) m_e^{a_{n,x}}, \tau > 0 \quad (3.9)$$

$$m_u^0 = m_u^e, \tau > 0$$

$$t_{cp}^B = \frac{1}{l^B} \int_{y^{Bn}}^{y^{Be}} t^B dy. \quad (3.10)$$

де t_{cp}^B – середня температура виробів, $^{\circ}\text{C}$;

l^B – товщина виробів, м.

При цьому основна увага приділяється реакції води з цементом. На підставі законів масообміну і згідно зробленим припущенням зміна кількості пасивної води визначається m_e^n з наступного рівняння:

$$\frac{dm_e^n}{d\tau} = \begin{cases} -a_{n,1} \cdot \exp\left(\frac{-a_{n,2}}{(t_{cp}^B + 273)}\right) S_n(\varphi_u^x - \varphi_u), \text{ при } \varphi_u^x > \varphi_u, \\ 0, \text{ при } \varphi_u^x \leq \varphi_u \end{cases}, \tau > 0 \quad (3.11)$$

де $a_{n,1}$, $a_{n,2}$ – постійні;

S_n – площа поверхні, що відокремлює область цементу, що прореагував, від того, що не прореагував;

φ_u^x, φ_u – відносна вологість відповідно частини цементу, що прореагувала і не прореагувала.

Відносну вологість встановлюють як відношення вологості матеріалу до вологості, що відповідає стану насичення. Відповідно до цього усереднене значення визначається φ_u із наступної залежності:

$$\varphi_u = \frac{m_e^a}{m_u^e \cdot d_u^e} \quad (3.12)$$

де d_u^e – вологість, що відповідає насиченню в області цементу, що не вступив в реакцію гідратації.

При визначенні усередненого значення φ_u^x необхідно враховувати що кількість води m_e^n включає в себе всю пасивну воду, зокрема й ту, що міститься поза цементними зернами:

$$\varphi_u^x = \begin{cases} 1, & \frac{m_e^n}{m_u^x} \geq d_u^x \\ \frac{m_e^n}{m_u^n \cdot d_u^x}, & \frac{m_e^n}{m_u^x} < d_u^x \end{cases} \quad (3.13)$$

де d_u^x – вологість, що відповідає стану насичення області цементу, що вступив в реакцію гідратації.

Постійні параметри E_x, a_x, n_x є параметрами хімічної реакції і характеризують активність цементу.

Величини $S_n, a_{n.1}, a_{n.2}, d_u^e, d_u^x$ є параметрами вологообмінних процесів. В процесі гідратації і внаслідок злипання зерен цементу (утворення комплексів) і поглиблення процесів, площа S_n змінюється, тобто площа поверхні, що відокремлює область що прореагував від цементу, що не прореагував.

Узагальнена система рівнянь, що описує тепловиділення як у випадку хемо-кінетичної моделі, так і у випадку фазово-топологічній моделі, має вигляд [6]:

$$\frac{dX}{d\tau} = FX(\tau), \quad X(0) = X_0, \quad Q(\tau) = f(X, \tau) \quad (3.14)$$

де $X(\tau)$, X_0 , $Q(\tau)$ – відповідно вектор концентрацій компонент в бетонній суміші, вектор початкових концентрацій, тепловиділення бетону.

Розв'язок рівняння (3.14) у випадку застосування різних моделей носять якісно різний характер. Для порівняння розглянемо хемо-кінетичну і фазово-топологічну моделі в одно компонентному наближенні, запропоновані в [23]. Ці рівняння маю вигляд:

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k(m_u^0 - m_u^x)^h, \quad m_u^x(0) = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k(m_u^0 - m_u^x)c^{1/D}t^{-1/D}, \quad m_u^x(0) = 0 \quad (3.16)$$

$$Q = e \cdot m_u^0 \quad (3.17)$$

де k , c , e , D – константа швидкості реакції, постійна величина, коефіцієнт пропорційності, фрактальна розмірність системи.

Рівняння (3.15) можна інтерпретувати як модель, в якій чинник розмноження не суттєво впливає на процес структуроутворення і йде заміщення фаз з просторовим обмеженням [6, 23]. Таке наближення справедливе лише для бетонних сумішей з малим часом твердіння і може давати завищені результати. Формула (3.16) більш наочно розкриває динаміку твердіння, вказуючи, що одним з основних параметрів є фрактальна розмірність D , яка характеризує фазовий перехід. Спростивши рівняння (3.15) та (3.16) шляхом розподілу процесу твердіння бетону на часові стадії на основі існуючих теоретичних положень, наведених вище, припускаючи, що в межах кожної стадії $k = \text{const}$. Прийmemo, що впродовж всього періоду зростання швидкість росту частини, що прореагувала, пропорційна її

поточному розміру, а саме об'єму m_u^x . Період зростання розділимо на два під періоди. При виведенні рівняння зростання для першого під періоду вважатимемо, що число зародків так мало, що об'єм частини, що прореагувала, визначається їх лінійним масштабом. Також, згідно [23], прийнемо, що лінійний масштаб l зародку кристалічного масиву у збільшується пропорційно часу. Тоді, з врахуванням того, що m_u^x є степеневою функцією l , отримаємо:

$$m_u^x = b \cdot l^d = b(a \cdot \tau)^d, \quad (3.18)$$

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k_1 m_u^x = k_1 \cdot b(a \cdot \tau)^d = k_1^0 \tau^d, \quad (3.19)$$

$$m_u^x(0) = 0,$$

де a, b – постійні величини, d – розмірність масштабу l .

У випадку якщо $d = 1, 2, 3$, маємо відповідно лінійні, плоскі, просторові кристали. Але при деякому критичному числі зародків характер їх зростання може змінитися. Це обумовлено тим, що вони, дифузійно взаємодіючи між собою, об'єднуються в кластери, утворюючи нові центри розмноження, що є початком другого періоду зростання. В цьому випадку m_u^x можна розглядати як макроскопічну характеристику системи кластерів, який вже не обчислюється за формулою (3.18) внаслідок того, що кластер є достатньо складною геометричною структурою. Тоді рівняння зростання (3.19) має наступний вигляд:

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k_1 m_u^x, \quad (3.20)$$

де k_1 – константа швидкості реакції в межах першого періоду часу.

Далі експоненціальне зростання частини бетону яка вступила в реакцію гідратації буде визначатися обмеженим об'ємом системи, тому механізм зростання визначатиметься процесами перенесення. Це також можна вважати початком другого, основного, періоду. Як вже

було сказано раніше, має місце дифузійне перенесення речовини. Тоді рівняння зміни об'єму приймає наступний вигляд:

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k_2 (m_u^0 - m_u^x)^n, \quad (3.21)$$

де k_2, n – відповідно константа швидкості реакції, порядок реакції.

У випадку $n=1$ отримаємо, що процес зміни m_u^x має експоненціальний характер, тобто протікає з найбільшою швидкістю порівняно з іншими значеннями n оскільки в цьому випадку розв'язок (3.21) матиме вид степеневої функції.

Проте, дифузійний режим, у свою чергу, обмежується кінетикою хімічної реакції, хід якої залежить як від непрогідратованої, так і від прогідратованої частини суміші. Тому в цьому випадку матимемо:

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k_3 (m_u^0 - m_u^x)^\alpha m_u^{x\beta}, \quad (3.22)$$

де α, β, k_3 – відповідно константи порядку реакції і константа швидкості реакції в межах другого періоду.

При $\alpha = 1, \beta = 1$ отримуємо наступне співвідношення:

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = k_3 (m_u^0 - m_u^x) m_u^x. \quad (3.23)$$

Рівняння (3.19) – (3.23) описують процеси гідратації, коли немає чіткого розділення між тією, що прогідратованою і непрогідратованою частинами бетонної суміші на структурному рівні.

Таким чином, протягом першого і другого періодів створюються передумови для утворення геометричної структури. Після цього на початку третьої стадії починається фазовий перехід, що описується рівнянням (3.16). Фазовий перехід продовжує носити характер самоорганізації і є розвитком процесів, що описаних виразами (3.21) – (3.23), на структурному рівні.

Отримана модель гідратації має вигляд:

$$\frac{dm_u^x}{d\tau} = \begin{cases} k_1^0 \tau^d, & 0 \leq \tau < \tau_1 \\ k_1 m_u^x, & \tau_1 \leq \tau < \tau_2 \\ k_2 (m_u^0 - m_u^x)^n, & \tau_2 \leq \tau < \tau_3, \quad m_u^x(0) = 0, \quad Q = e \cdot m_u^x \\ k_3 (m_u^0 - m_u^x) m_u^x, & \tau_3 \leq \tau < \tau_4 \\ k_4 (m_u^0 - m_u^x) c^{1/D} \tau^{-1/D}, & \tau \geq \tau_4 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$m_u^x(\tau_1-0) = m_u^x(\tau_1+0), \quad m_u^x(\tau_2-0) = m_u^x(\tau_2+0), \quad m_u^x(\tau_3-0) = m_u^x(\tau_3+0), \\ m_u^x(\tau_4-0) = m_u^x(\tau_4+0), \quad (3.25)$$

$$\left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_1-0} = \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_1+0}, \quad \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_2-0} = \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_2+0}, \\ \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_3-0} = \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_3+0}, \quad \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_4-0} = \left. \frac{dm_u^x}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_4+0}, \quad (3.26)$$

де k_1^0 , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – відповідно константи швидкості реакції в межах першої, другої, третьої стадій твердіння.

Об'ємна потужність тепловиділень буде визначатися як:

$$f(\tau) = \frac{dQ}{d\tau}. \quad (3.27)$$

Рівняння (3.24) описує процес твердіння, рівняння (3.25), (3.26) містять інформацію про те, що при переході від стадії до стадії об'єм речовини, що прореагувала, і швидкість його зміни не міняються раптово, що є наслідком закону збереження маси. Запропонована математична модель, не суперечить існуючим хемо-кінетичній і фазово-топологічній моделям, об'єднує в собі їх ключові положення. Перші два періоди з позиції цих моделей об'єднуються в період розмноження. З моменту настання третього періоду починається формування геометричної структури бетонної суміші, яке можна розглядати як кінетичний процес, так і фазово-топологічний перехід,

що узгоджується як з хемо-кінетичною, так і з фазо-топологічною моделями.

3.3 Матеріальний баланс пароповітряного середовища пропарювальної камери

Зовнішній тепло- і масообмін визначає умови взаємодії пароповітряного середовища, яке створене в пропарювальній камері, та виробу, який піддається тепловологісній обробці. Згідно [23] від умов взаємодії пароповітряного середовища з виробом залежить швидкість нагрівання виробу, ступінь зволоження його поверхні, а також температурне поле в камері для тепловологісної обробки бетонних виробів.

Пароповітряне середовище створюється безпосередньо в пропарювальній камері рис. 2.6. Перед початком роботи АНРТ та створення пароповітряного середовища в пропарювальній камері знаходилося повітря з температурою рівною температурі повітря в лабораторії, тиск в ній, якщо вона не повністю герметична, буде дорівнювати атмосферному. З початком тепловологісної обробки тиск в пропарювальній камері P^K дорівнюватиме атмосферному і буде складатись з парціального тиску водяної пари P_{Π} та парціального тиску повітря $P_{\text{пов.}}$:

$$P^K = P_{\Pi} + P_{\text{пов.}}, \quad (3.28)$$

$$P_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}^K (t^K + 273)}{V^K \rho_{\Pi}}, \quad (3.29)$$

$$P_{\text{пов.}} = \frac{M_{\text{пов.}}^K (t^K + 273)}{V^K \rho_{\text{пов.}}}, \quad (3.30)$$

де M_{Π}^K , $M_{\text{пов.}}^K$ – маса відповідно пари і повітря у робочому просторі пропарювальної камери, кг;

V^K – об'єм робочого простору пропарювальної камери, м³;

t^K – температура пароповітряної суміші у робочому просторі пропарювальної камери, $^{\circ}\text{C}$;

$\rho_{\Pi}, \rho_{\text{ПОВ}}$ – густина відповідно пари і повітря у робочому просторі пропарювальної камери, кг/м^3 .

Пара, потрапляючи на більш холодну поверхню, конденсується. На поверхні утворюється плівка конденсату товщиною δ , поверхня нагрівається і її температура збільшується, прагне зрівнятися з температурою пароповітряного середовища. Запишемо рівняння загального матеріального балансу пароповітряної суміші в пропарювальній камері:

$$M^K = M_{\Pi}^K + M_{\text{ПОВ}}^K, \quad (3.31)$$

де M^K – маса пароповітряної суміші в робочому просторі пропарювальної камери, кг .

Враховуючи (3.31) визначимо масові концентрації повітря y_{Π}^K і пари $y_{\text{ПОВ}}^K$ в пропарювальній камері:

$$y_{\Pi}^K = \frac{M_{\Pi}^K}{M^K}, \quad y_{\text{ПОВ}}^K = 1 - y_{\Pi}^K. \quad (3.32)$$

Враховуючи вище викладене запишемо рівняння матеріального балансу для повітря пароповітряної суміші в робочому просторі пропарювальної камери з наступними початковими умовами:

$$\begin{aligned} M_{\text{ПОВ}}^K &= M_{\text{ПОВ}_0}^K, \quad \tau = 0, \\ \frac{dM_{\text{ПОВ}}^K}{d\tau} &= G^{\Pi} + G^B, \quad \tau > 0. \end{aligned} \quad (3.33)$$

де $M_{\text{ПОВ}_0}^K$ – початкова маса повітря в пароповітряній суміші робочого простору пропарювальної камери, кг ;

$G^{\Pi} = G_c^{\Pi} y_{\Pi}^{\text{Прим}}$ – витрата повітря в пропарювальній камері, кг/с ;

$G^B = G_c^B y_{II}^{Прим}$ – витрата води, що надходить в пропарювальну камеру, кг/с;

3.4 Енергетичний баланс пароповітряного середовища пропарювальної камери

В загальному випадку повна енергія газу складається з його внутрішньої енергії (ентальпії) та роботи, яка здійснюється зі зміною його об'єму [79]. Оскільки, вільний об'єм камери практично залишається незмінним під час ТВО, тому зміна повної внутрішньої енергії пароповітряної суміші в установці буде приблизно дорівнювати зміні її ентальпії h .

$$\begin{aligned} h^K &= h_{II}^K \cdot y_{II}^K + h_{ПОВ}^K \cdot y_{ПОВ}^K, \\ h_{II}^K &= r_{II}^0 + c_{II} t^K h_{ПОВ}^K = c_{ПОВ} t^K \end{aligned} \quad (3.34)$$

де $h_{II}^K, h_{ПОВ}^K$ – питома ентальпія відповідно повітря і пари в пароповітряній суміші, Дж/кг;

r_{II}^0 – питома теплота пароутворення пари при нульовій температурі, Дж/кг;

$c_{II}, c_{ПОВ}$ – питома масова теплоємність відповідно повітря і пари, Дж/кг $^{\circ}\text{C}$.

Запишемо рівняння балансу енергії для пароповітряної суміші в пропарювальній камері:

Таким чином, баланс енергії для пароповітряного об'єму автоклавної установки можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d(h^y M^y)}{d\tau} &= Q^{\Pi} + Q^{Воду} + Q^T - Q_{заг}^{\Phi} - Q_{заг}^B - Q_{заг}^K - Q_{заг}^{КД}, \tau > 0 \\ h^y M^y &= h_0^y M_0^y, \tau = 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

де h_0^y, M_0^y – початкове значення відповідно ентальпії та маси пароповітряної суміші у вільному об'ємі установки; $Q^{\Pi} = G^{\Pi} h^{\Pi}$ –

тепловиділення потоку повітря, який надходить від аеродинамічного нагрівача; $Q^{Bодu} = G^{Bодu} h^{Bодu}$ – кількість теплоти, що вноситься в систему разом із розпиленою водою; $Q^T = G^{Конд} c(t_2^K - t_1^K)$ – кількість теплоти відібрана теплоутилізатором на підігрів конденсату; $Q_{заг}^\Phi = S^\Phi q_{заг}^\Phi$ – загальна кількість тепла, яка передається за одиницю часу формам виробів; $Q_{заг}^B = Q_{заг}^{Bв} + Q_{заг}^{Bн}$ – загальна кількість тепла, яка передається за одиницю часу верхній і нижній поверхні виробу ($Q_{заг}^{Bв} = S^{Bв} q_{заг}^{Bв}$, $Q_{заг}^{Bн} = S^{Bн} q_{заг}^{Bн}$); $Q_{заг}^K = S^K q_{заг}^K$ – загальна кількість тепла, яка передається за одиницю часу корпусу камери; $Q_{заг}^{КД} = G^{Bв} h^{Bв} + G^{Bн} h^{Bн} + G^\Phi h^\Phi + G^K h^K$ – загальна кількість тепла, яка передається за одиницю часу конденсату; G^Π , $G^{Bодu}$, $G^{Конд}$ – витрата повітря, води та конденсату; $G^{Bв}$, $G^{Bн}$, G^Φ , G^K – маса пари, яка конденсується за одиницю часу, відповідно, на верхній і нижній поверхні виробів, формах і корпусі камери; S^Φ , $S^{Bв}$, $S^{Bн}$, S^K – площа теплосприймальної поверхні, відповідно, форм, верхньої і нижньої частини виробів, камери; $h^{Bв}$, $h^{Bн}$, h^Φ , h^K – питома ентальпія конденсату який утворюється, відповідно, на верхній і нижній поверхні виробів, формах та корпусі камери; h^Π , $h^{Bодu}$ – питома ентальпія, відповідно, повітря та води; c – питома теплоємність конденсату; t_1^K , t_2^K – температура конденсату, відповідно, до та після підігріву.

Отже, після перетворень та з врахуванням вище викладеного рівняння (3.35) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d(h^y M^y)}{d\tau} &= G^\Pi h^\Pi + G^{Bодu} h^{Bодu} + Gc(t_2^K - t_1^K) + (G^{Bв} - G^{Bн})h^{Bв} - , \tau > 0 \quad (3.36) \\ &- (G^{Bв} h^{Bв} + G^{Bн} h^{Bн} + G^\Phi h^\Phi + G^K h^K) - Q_{заг}^\Phi - Q_{заг}^K \\ h^y M^y &= h_0^y M_0^y , \tau = 0 \end{aligned}$$

Дослідження математичної моделі теплового балансу пароповітряного об'єму пропарювальної камери, надає можливість більш якісно визначати співвідношення її конструктивних, теплових та режимних параметрів, з метою забезпечення енергозбереження в цілому.

3.5 Ексергетичний баланс пароповітряного середовища пропарювальної камери

Енергетичне обстеження є важливою складовою енергетичного управління, яке характеризує енергоспоживання в той або інший період функціонування підприємства. Основною метою енергетичного обстеження є: аналіз існуючих систем енергопостачання; аналіз ефективності енергозабезпечення теплотехнологічних процесів; кількісне визначення об'ємів енергоспоживання; оцінка ефективності використання енергоресурсів на підприємстві; розробка енергобалансів підприємства за характерні проміжки часу; визначення основних споживачів енергоресурсів і структури енергоспоживання; визначення втрат енергоресурсів (кількісна оцінка і структура втрат); виявлення нераціонального використання енергоресурсів; розробка енергозберігаючих проектів [67].

Шляхи зниження витрат енергоресурсів при тепловологісній обробці бетонних виробів можна поділити на дві групи:

1. технологічні – пов'язані з впровадженням новітніх технологій та переглядом нормативної бази;
2. енергетичні – пов'язані з енергозабезпеченням технологічного процесу.

Разом з тим необхідно спільно розглядати такі чинники виробничого процесу, як абсолютне і питоме енергоспоживання, поточний стан устаткування і всієї інфраструктури підприємства, умови роботи персоналу, екологічні проблеми тощо.

Аналіз проблеми енергозбереження при тепловологісній обробці бетонних виробів, а також проведені нами дослідження в роботах [67, 68] потребують визначення ексергії технологічного процесу. Оскільки, зі зниженням температури пароповітряного середовища (під час охолодження виробів) збільшується різниця між енергією та ексергією даного технологічного процесу.

Ексергетичний аналіз дозволяє виконувати оптимізацію параметрів технологічних процесів [66] тепловологісної обробки бетонних виробів, яка може полягати:

- у виборі оптимальних параметрів технологічного процесу;
- у виборі режимів роботи устаткування;

- в заміні устаткування;
- в реструктуризації системи.

На рис. 3.5 представлено схему ексергетичних потоків теплових процесів тепловологісної обробки бетонних виробів в пропарювальній камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу.

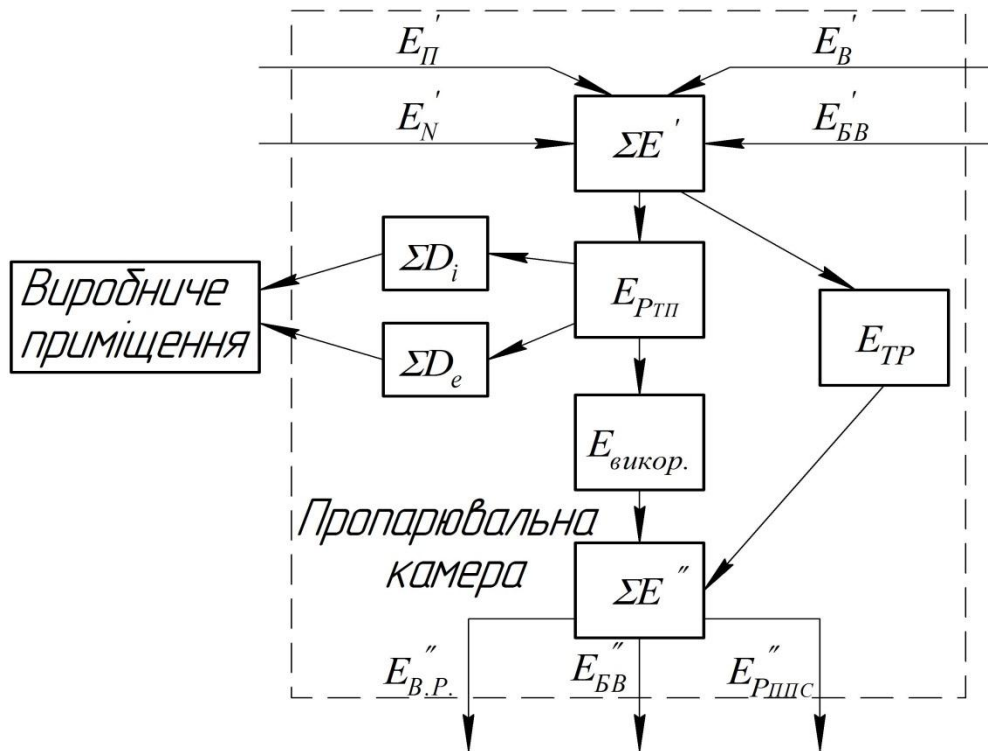


Рис. 3.5. Схема ексергетичних потоків теплових процесів тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагріву: E'_N , $E'_П$, $E'_Б$ – ексергія витрачених первинних енергоресурсів, відповідно, потужності електродвигуна аеродинамічного нагрівача роторного типу, повітря та води; $E'_{БВ}$ – ексергія складових матеріалів бетонної суміші; $\Sigma E'$ – сума всіх вхідних потоків ексергії технологічного процесу; $E_{P_{ТП}}$ – ексергія, яка необхідна для реалізації технологічного процесу тепловологісної обробки; $E_{тр.}$ – транзитна ексергія (немає ні якісних, ні кількісних змін); $E_{викор.}$ – корисна ексергія – необхідна для отримання бетонних виробів із заданими фізико-механічними властивостями; ΣD_i – внутрішні втрати ексергії пов'язані з внутрішніми процесами тепломасообміну; ΣD_e – зовнішні втрати ексергії (тепловтрати через корпус пропарювальної камери); $\Sigma E''$ – сума всіх вихідних потоків

ексергії технологічного процесу; $E''_{B.P.}$ – ексергія вторинних потоків (подальше використання конденсату); $E''_{БВ}$ – ексергія готових бетонних виробів; $E''_{Рппс}$ – ексергія рециркуляції пароповітряної суміші.

Враховуючи схему потоків ексергії технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів можна записати баланс ексергії для пропарювальної камери з аеродинамічним нагрівачем роторного типу:

$$\Sigma E' = \Sigma E'' + \Sigma D, \quad (3.37)$$

де ΣD – сума всіх втрат ексергії технологічного процесу,
 $\Sigma D = \Sigma D_e + \Sigma D_i$.

Позначені на рисунку потоки ексергії пов'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$\Sigma E' = E'_N + E'_П + E'_B + E'_{БВ} = E_{Ргп} + E_{тр}, \quad (3.38)$$

$$\Sigma E'' = E''_{B.P.} + E''_{БВ} + E''_{Рппс}, \quad (3.39)$$

$$E_{Ргп} = E_{викор.} + \Sigma D_e + \Sigma D_i. \quad (3.40)$$

Ексергетичну потужність технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів в пропарювальній камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу можна визначити за наступними залежностями:

- ексергетична вхідна потужність технологічного процесу

$$P'_e = \Sigma E' / \tau; \quad (3.41)$$

- ексергетична вихідна потужність технологічного процесу

$$P''_e = \Sigma E'' / \tau. \quad (3.42)$$

де τ – тривалість технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів.

Ексергетичний коефіцієнт корисної дії $KKД_e$ визначається за залежністю [66, 69]

$$\eta_e = \Sigma E'' / \Sigma E' = 1 - \Sigma D / \Sigma E'. \quad (3.43)$$

Наведені залежності (3.37 – 3.43) надають можливість здійснювати вибір та оцінку конструктивних і теплотехнологічних параметрів та характеристик устаткування для тепловологісної обробки бетонних виробів на стадії проектування, а також здійснювати оптимізацію основних параметрів технологічного процесу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ

4.1 Методика і програма досліджень

Повний цикл ТВО підрозділяють на 4 основних етапи (див. детальніше розділ 1).

Необхідно відзначити, що технологічні режими всіх чотирьох етапів залежать від різних чинників (виду цементу, В/Ц відношення, необхідної міцності бетону, виду конструкції, наявного технологічного устаткування тощо) і, як правило, їх тривалість підбирається дослідним шляхом. Оптимізація здійснюється методом проб і помилок, що економічно недоцільно. Збої в технологічному процесі також приводять до негативних наслідків. Оперативне втручання в процес зв'язане з великими труднощами (виявлення характеру збоїв і прогнозування його впливу на подальші операції технологічного ланцюга). Крім того, ТВО бетонних виробів відбувається у вологому повітрі, яке є сумішшю сухого повітря і водяної пари. Співвідношення цих двох складових істотно впливає на режими обробки. Для вирішення поставленого завдання запропонований інженерний метод розрахунку, який базується на математичному моделюванні, як окремих етапів, так і всього технологічного процесу, а також на контролі характерних показників процесу ТВО.

Режими тепловологісної обробки, які поширені на існуючих підприємствах і рекомендовані в роботах [2, 39, 40] характеризуються: часом подачі теплоносія в камеру, зміною температури теплового агенту (рис. 4.1). Дані режими відрізняються різними значеннями температури ізотермічної витримки, температури кінця ділянки охолодження, часом ізотермічної витримки, швидкістю зміни температури на ділянках підігріву та охолодження. Значення параметрів, які характеризують режими тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівача роторного типу, наведені в таблиці 4.1.

Предметом досліджень були зразки бетонних виробів. Властивості отриманих дослідних зразків бетонних виробів досліджувались згідно стандартних методик.

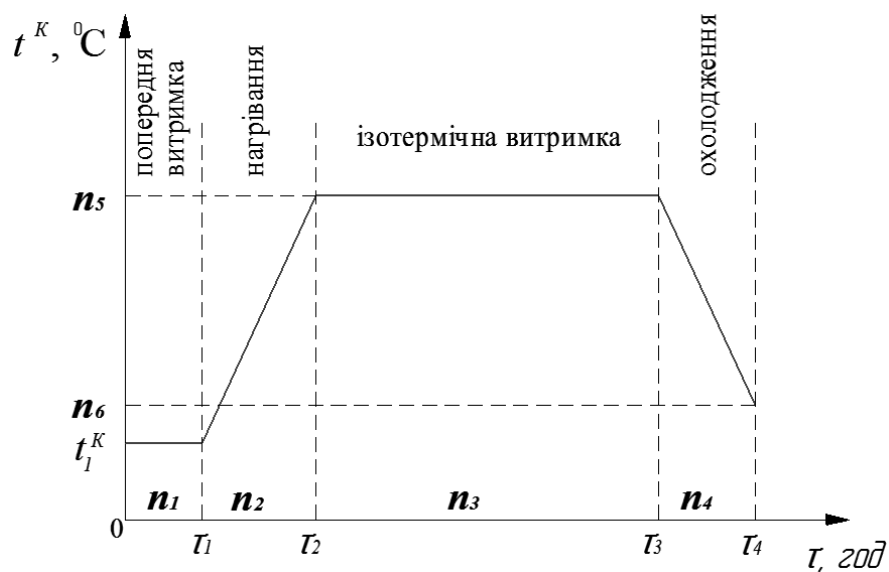


Рис. 4.1. Загальний вигляд технологічного режиму тепловологісної обробки бетонних виробів з аеродинамічним нагрівачем роторного типу

Таблиця 4.1

Параметри режимів тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівача

Назва параметра	Позначення n_i	Нижня межа діапазону	Базове значен ня	Верхня межа діапазону
Час завершення попередньої витримки, год.	n_1	1	1,5	2
Швидкість нагрівання, °C/год.	n_2	10	12,5	15
Тривалість ізотермічної витримки, год.	n_3	6	9	12
Швидкість охолодження, °C/год.	n_4	10	12,5	15
Температура ізотермічної витримки, °C	n_5	80	85	90
Кінцева температура після охолодження, °C	n_6	20	30	40
Початкова температура в камері, °C	$t_1^K = t_{ппс}(\tau_1)$	16	18	20

Експериментальні дослідження об'єкта досліджень проводилися у науково-дослідній лабораторії гідродинаміки Вінницького

національного технічного університету з використанням відповідного обладнання та засобів для реєстрування вимірювальних величин. Виготовлені згідно запропонованого технологічного процесу тепловологісної обробки бетонні вироби перевірені на відповідність нормативним вимогам, що висуваються до даного типу бетонних виробів.

Обробку та співставлення теоретичних і експериментальних даних проводили за допомогою ЕОМ з використанням програмного пакету MathCAD 14.

У дослідженнях використовувалися стандартні методики, рекомендації і вказівки відповідних норм, технічних вказівок, інструкцій по дослідженню міцності, морозостійкості, щільності, водопоглинення бетону.

Ефективність методу обробки бетонних виробів характеризували:

- міцністю бетону на стиск;
- щільністю бетону;
- морозостійкістю;
- водопоглиненням;
- стираністю матеріалу.

Усі зазначені вище фактори залежать як від максимальної температури прогріву, вологості, тиску так і тривалості впливу.

Властивості зразків-кубиків з бетону, виготовленого згідно запропонованого технологічного процесу досліджувались згідно стандартних методик [48] з метою отримання матеріалу, властивості якого б відповідали вимогам встановлених ГОСТ 5802-86, ДСТУ Б В 2.7-32-95 і ДСТУ Б В 2.7-23-95.

Для вивчення даного способу тепловологісної обробки використовувалася спеціальна пропарювальна камера (рис 4.2), що дозволяла визначати перераховані характеристики.

Для контролю тиску в лабораторно-експериментальних дослідженнях використовувалися механічні манометри типу МТП-30.

Вимірювання температур проводилися спочатку через 5 – 10 хвилин, потім через 10 – 15 хвилин протягом усього технологічного процесу тепловологісної обробки з використанням аеродинамічного нагріву. Дослідам піддавалися бетонні кубики розміром 40×40×160 мм. Виготовлені та оброблені згідно запропонованого технологічного

процесу зразки бетонних виробів пройшли випробування на стиск, морозостійкість, водонепроникність та стиранність.

Визначення міцності на стиск визначається руйнівним способом за допомогою гідравлічного преса марки П-125 відповідно до ГОСТ 10180-78.

Стиранність матеріалу досліджували на спеціальному обладнанні, марка – ЛКИ-3 відповідно з ГОСТ 13087-81.

4.2 Експериментальні стенди, обладнання та апаратура

Дослідження проводилися, з метою вивчення взаємозалежностей між параметрами і характеристиками нового запропонованого устаткування та фізичними і фізико-механічними властивостями оброблюваних виробів, на спроектованому та виготовленому стенді – дослідній пропарювальній камері (конструкція розроблена в НДІ гідродинаміки ВНТУ), схема та загальний вигляд якої наведені на рис. 4.2 та 4.3.

Отримані експериментальні дані дають можливість оцінити достовірність теоретичних досліджень, на основі отриманих вихідних даних створити нові та оптимізувати існуючі установки для тепловологісної обробки бетонних виробів, а також удосконалити окремі конструктивні елементи установок, зокрема джерело пароутворення розташоване безпосередньо в камері, що забезпечить отримання бетонних виробів з наперед заданими фізико-механічними (середня густина, міцність при стиску, стиранність, морозостійкість та водопоглинення) властивостями при зниженні матеріало-, енергомісткості та підвищенні екологічної чистоти виготовлення бетонних виробів.

Експериментальна установка складається з герметичної теплоізованої камери 1 розміром 500×600×1200 мм, в якій на спеціальних решітчастих полицях встановлених на вертикальному стелажі 7 розташовуються оброблювані вироби.

Керування виготовленням бетонних виробів ускладнюється багатостадійністю, безперервно-дискретним характером основних етапів технологічного процесу, їх територіальною розподіленістю та часовою роздрібненістю.

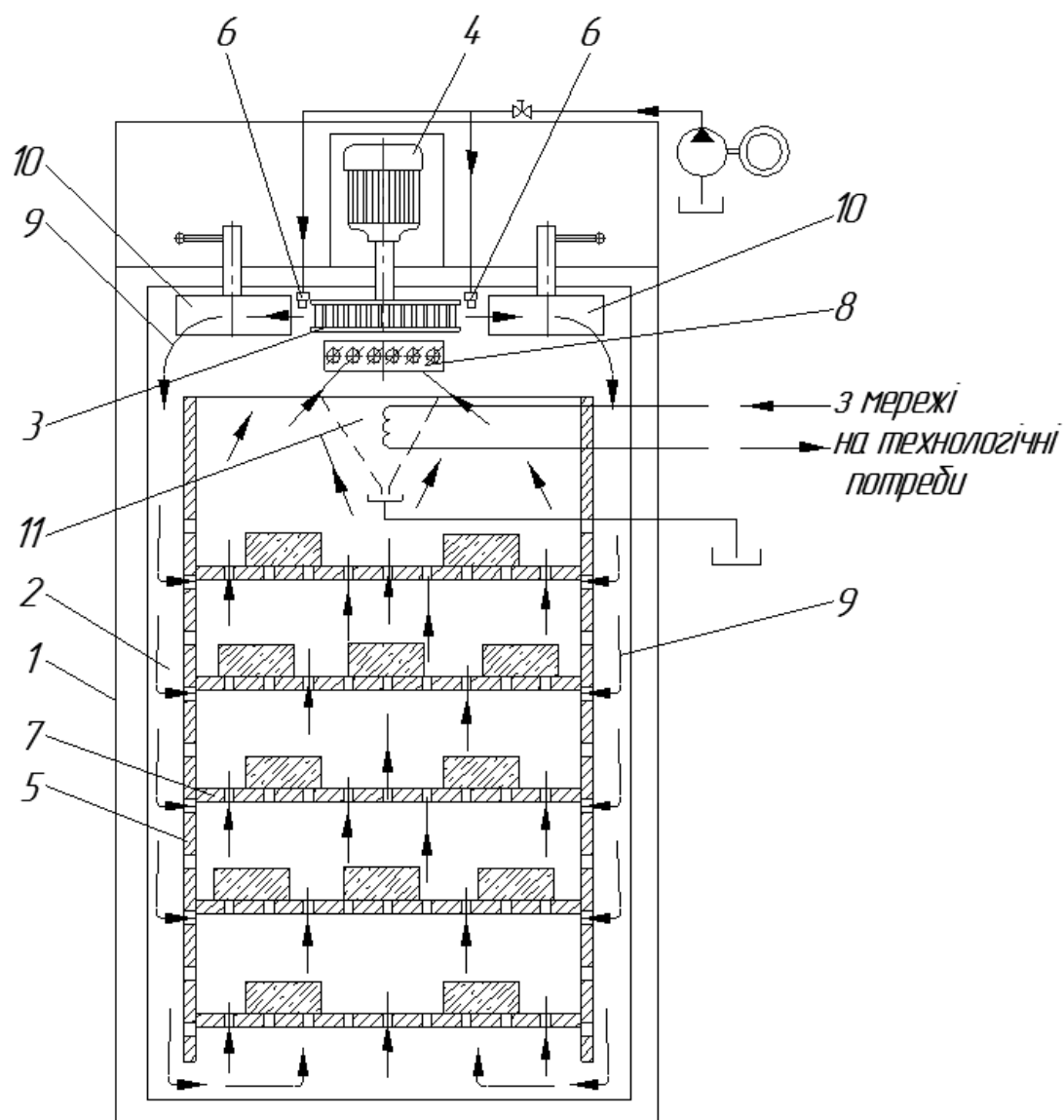


Рис. 4.2. Принципова схема випробувальної пропарювальної камери: 1 – теплоізолюваний корпус; 2 – внутрішня порожнина; 3 – аеродинамічний нагрівач роторного типу; 4 – електродвигун; 5 – направляючі екрани із розгалуженою системою розподільчих отворів; 6 – дистанційно керовані розпилювальні форсунки; 7 – вертикальні стелажі з решітчастими полицями; 8 – дистанційно керована жалюзійна ґратка; 9 – горизонтальні повздовжні повітропроводи; 10 – регулювальні дросель-клапани; 11 – теплообмінний апарат.



Рис. 4.3. Загальний вигляд випробувальної пропарювальної камери

Процес тепловологісної обробки характеризується наступними особливостями [31]:

- періодичним характером технологічного процесу, який виключає статичні режими при виготовлення бетонних виробів, та автоматизацію його тільки на основі систем режимної стабілізації;
- розподіленістю та великою кількістю взаємопов'язаних вихідних технологічних параметрів виробів й апаратури управління.

Об'єктом управління є пропарювальна камера тепловологісної обробки, в яких бетонні вироби проходять задані режими технологічного процесу.

Дані режими відрізняються різними значеннями температури ізотермічної витримки, температури кінця ділянки охолодження, часом ізотермічної витримки, швидкістю зміни температури на ділянках підігріву та охолодження рис. 4.1. Значення параметрів, які характеризують режими тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівача роторного типу, наведені в таблиці 4.1.

Запишемо функціональну залежність температури пароповітряного середовища $t_{ППС}$ в камері від часу τ , параметрів $n = (n_i)$ та значення початкової температури в камері після закінчення попередньої витримки:

$$t_{ППС} = \begin{cases} \frac{n_5 - t_1^K}{\tau_1 - \tau_2} (\tau - \tau_1) + t_1^K, & \text{при } \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \\ n_5, & \text{при } \tau_2 \leq \tau \leq \tau_3 \\ \frac{n_6 - n_5}{\tau_4 - \tau_3} (\tau - \tau_3) + n_5, & \text{при } \tau_3 \leq \tau \leq \tau_4 \end{cases}, \quad \tau \in [\tau_1, \tau_4] \quad (4.1)$$

$$\tau_2 = \tau_1 + \frac{n_5 - t_1^K}{n_2}; \quad \tau_3 = \tau_1 + n_3; \quad \tau_4 = \tau_3 + \frac{n_6 - n_5}{n_4}$$

де $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ – час закінчення ділянки, відповідно, попередньої витримки, підйому температури, ізотермічної витримки та завершення технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів, $\tau_4 = \tau_K$.

Тривалість попередньої витримки τ_1 визначає час початку утворення пароповітряної суміші в камері тепловологісної обробки бетонних виробів:

$$G^П(\tau) = 0, \quad G^{Воду}(\tau) = 0, \quad \tau \in [0, \tau_1]$$

де $G^П, G^{Воду}$ – масові витрати, відповідно, повітря та води.

Величина $G^П(\tau)$ визначає: значення функції керування двигуном АНРТ $\delta^{АНРТ}(\tau)$ та величину масової витрати пароповітряної суміші $G^{ППС}(\tau) = G^П(\tau) + G^{Воду}(\tau)$

$$\delta^{АНРТ} = \begin{cases} 0, & G^П = 0 \\ 1, & G^П > 0 \end{cases}$$

$$G^{ППС} = \begin{cases} 0, & G^П + G^{Воду} = 0 \\ G^{ППС}, & G^П + G^{Воду} > 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Залежності 4.2 описують систему керування двигуном АНРТ та дистанційним керуванням жалюзійної ґратки всмоктуючого каналу АНРТ, тобто об'ємом рециркуляційного потоку. Величина рециркуляційного потоку $G_p^{ппс}(\tau)$ визначається пропускною здатністю жалюзійної ґратки всмоктуючого каналу АНРТ $\bar{G}_p^{ппс}$.

$$G_p^{ппс}(\tau) = \bar{G}_p^{ппс}, \tau \in [0, \tau_k] \quad (4.3)$$

Для проміжку часу $\tau \in [0, \tau_1]$ $G^П(\tau) = G^{Воду}(\tau) = 0$.

Для проміжку часу $\tau \in [\tau_1, \tau_4]$ необхідно визначити функції $G^П(\tau)$, $G^{Воду}(\tau)$, які забезпечили б зміну температури в камері у вигляді (4.1).

Згідно з залежностями викладеним у [2, 31] та (4.1 – 4.3) складено блок-схему алгоритму керування технологічними режимами тепловологісної обробки (рис. 4.4).

Запропонований алгоритм керування технологічними режимами тепловологісної обробки бетонних виробів дозволяє:

- управляти процесом за програмою, заданою оператором;
- стабілізувати і регулювати параметри технологічного процесу незалежно один від одного;
- інформувати оператора про хід технологічного процесу, з видачею попереджень про аварійні ситуації;
- вести архівацію основних даних про перебіг процесу тепловологісної обробки.

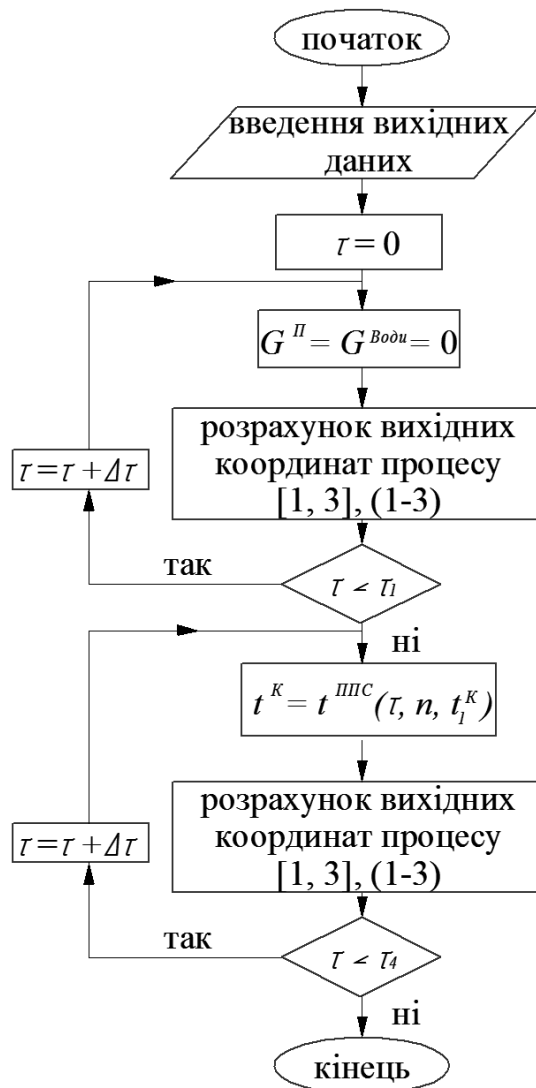


Рис. 4.4. Блок-схема алгоритму керування технологічними режимами тепловологісної обробки бетонних виробів.

В основу системи керування технологічними режимами тепловологісної обробки бетонних виробів закладено принцип безперервного контролю температури, стану виконавчих пристроїв одночасно за всіма об'єктами регулювання і управління згідно заданих режимів. Контроль температури здійснюється за допомогою електронних сенсорів температури. Сенсори розташовані на трьох рівнях по висоті в камер, що забезпечує підвищену точність контролю температури. Провівши порівняння отриманих даних вимірювання із заданими тепловими режимами тепловологісної обробки і дійсним станом температури в камерах, автоматизована система проводить аналіз і генерацію команд управління на подачу пароповітряної

суміші (керування жалюзійною ґраткою всмоктуючого каналу АНРТ та розпилювальними форсунками) або його припинення [39, 42, 58, 59].

На контрольно-вимірювальному вузлі розміщений багатоканальний реєструючий пристрій Meterman TMD 90, який призначений для вимірювання та реєстрування температури. Через USB вихід реєструвальний пристрій Meterman TMD 90 під'єднується до ПК, в якому за допомогою спеціального програмного забезпечення Meterman TMSW фіксуються температури у вигляді графіків залежності температур від часу.

4.3 Характеристика використовуваних матеріалів

У дослідженнях використовувалися наступні матеріали:

- портландцемент Кам'янець-Подільського заводу М500. Основні фізико-механічні властивості застосовуваного цементу приведені в табл. 4.2 , хімічний склад – табл. 4.3;
- дрібний заповнювач (пісок) Дніпровського та Могилів-Подільського кар'єрів (табл. 4.4);
- крупний заповнювач – щебінь фракції 5-20 мм Гніваньського кар'єру (табл. 4.5);

Таблиця 4.2

Фізико-механічні характеристики портландцементу

В'язуче	Нормальна густина	Строки тужавлення, год.		Тонкість помолу (залишок на ситі 008), %	Істинна густина, кг/м ³	Питома поверхня, см ² /г
		початок	кінець			
Кам'янець-Подільський портландцемент М 400	25	1,0	4,0	13,4	3100	3400

Таблиця 4.3

Хімічний склад портландцементу

В'язуче	Вміст оксидів, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O + Na ₂ O	SO ₃	n.n.n
Кам'янець-Подільський портландцемент М 400	22,86	4,55	4,11	61,9	1,11	0,41	1,82	2,51

Таблиця 4.4

Характеристики дрібних заповнювачів

Вид піску	Характеристики					
	насипна густина, кг/м ³	істинна густина, кг/м ³	порожнистість, %	модуль крупності	питома поверхня, см ² /г	вміст пиловидних і глинистих частинок, %
Дніпровський (річковий)	1430	2620	42,2	1,2	42,6	0,5
Могилів Подільського кар'єру	1415	2590	43,0	1,8	27,3	1,85

Таблиця 4.5

Характеристика крупного заповнювача

Показники	Щебінь гранітний Гніваньського кар'єру
Щільність, кг/м ³	2720
Насипна щільність, кг/м ³	1330
Пустотність, %	48,5
Забрудненість, %	1,2
Гранулометричний склад, мм	
20	21,3
10	70
5	98,8

4.4. Планування багатофакторного експерименту та параметрична оптимізація значень величин міцності бетону

Традиційним методом моделювання багатофакторного технологічного процесу є планування експерименту. Планування експерименту передбачає наявність експериментальної установки та побудову регресійних залежностей на основі дійсних вхідних та вихідних факторів, отриманих експериментально. На стадії розробки експериментальної установки одним із особливо важливих джерел інформації для встановлення аналітичних взаємозалежностей між вхідними та вихідними змінними, які суттєво впливають на якість вихідної продукції, можуть бути експертні оцінки [41].

Для одержання оптимальних структур бетонів із заданими властивостями у технології бетонів використовується принцип оптимізації технологічних процесів. Задача вибору оптимального рішення складна й актуальна. Розрізняють дві задачі оптимізації:

1. Досягнення поставленої мети (міцність бетону) при мінімальній витраті ресурсів;
2. Одержання найбільшого ефекту (максимальна міцність бетону) при заданих ресурсах.

Для оптимізації процесу системи необхідний критерій ефективності, яким визначається ступінь досягнення поставленої мети. Він приймає при найбільш вигідних умовах мінімальне чи максимальне значення, що характеризуються приростом міцності (R_b^{28}).

Труднощі, зв'язані з вибором критерію ефективності, полягають у тому, що звичайно є ряд критеріїв, а їх оптимум, як правило, не збігається. У цих умовах вибирають основний критерій і призначають межі зміни параметрів процесу, що забезпечує ефективне його протікання. При оптимізації окремих технологічних процесів призначають локальні критерії оптимізації (міцність бетону). Одною з задач оптимізації є призначення обмежень, що впливають з необхідності ухвалення компромісного рішення у випадку суперечливих вимог.

Одна з найголовніших задач, що вирішуються в даній роботі є максимальне прискорення набору розпалубочної міцності бетоном.

Експериментальним шляхом встановлено, що критичної міцності при твердненні в умовах вібраційного ТСВ бетонний виріб набирає за термін близько 5 год. обробки. Більша міцність зразків безпосередньо після обробки не завжди була такою після 28 діб твердіння в нормальних умовах. Тому нами було вирішено провести оптимізацію двох критеріїв:

В роботах [30, 43] були розглянуті існуючі технології тепловологісної обробки (ТВО) будівельних виробів і матеріалів. Альтернативою розглянутим технологіям було прийнято застосування новітньої технології аеродинамічного нагріву [30], згідно якої, основний теплогенеруючий пристрій – аеродинамічний нагрівач роторного типу здійснює безперервну рециркуляцію повітряного потоку, передає тепло елементам робочої камери і рівномірно розігріває виріб.

Запропонований, в роботах [30, 43], технологічний процес ТВО бетонних виробів та проведений багатofакторний експеримент дозволяє встановити діапазони зміни режимних параметрів та характеристик технологічного устаткування, які забезпечуватимуть задані фізико-механічні характеристики оброблюваних виробів.

Ступінь досягнення поставленої мети визначається необхідним критерієм ефективності, який (для оптимізації технологічного процесу) приймає мінімальне чи максимальне значення, що характеризуються приростом міцності бетонного виробу.

Значення величини міцності R_b є функцією 3-х параметрів:

$$R_b = f(t, \varphi, \tau) \quad (4.4)$$

де t – температура витримки бетонних виробів, °C;

φ – відносна вологість пароповітряної суміші, %;

τ – тривалість процесу тепловологісної обробки, год.

При визначенні діапазонів варіювання факторів використовуємо умову, на підставі якої будь-який вибір факторів, в передбачених планом експерименту діапазонах, може бути практично реалізований. Для цього проведені пошукові експерименти з метою визначення областей, в яких значення рівнів факторів буде чітко визначено. В результаті проведених пошукових експериментів для кожного фактора встановлені такі значення: X_{j0} – основний рівень фактора;

X_{jmax} , X_{jmin} – верхній та нижній рівні фактора; αX_{jmax} , αX_{jmin} – зіркові верхній та нижній рівні фактора; α - зіркові плечі; I_j – інтервал варіювання.

Всі відзначені фактори, розмірні величини, мають різні розмірності, а значення величин факторів мають різні порядки. Тому виконувалось кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору за формулою:

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j}. \quad (4.5)$$

Встановлені наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: верхній +1; середній 0; нижній – 1; зірковий верхній +1,682; зірковий нижній –1,682.

Основні рівні, інтервали варіювання та межі області експериментальних досліджень приведені в таблиці 4.6.

Матриця планування і результати експерименту приведені в таблиці 4.7.

Кількість дослідів для багатофакторного експерименту при квадратичній регресії визначалась за формулою:

$$N = 2^{k-1} + 2k + N_0, \quad (4.6)$$

де k – кількість факторів;

2 – кількість рівнів;

N_0 – кількість дослідів в центрі плану, приймаємо $N_0=f(k)=f(3)=10$ згідно [46].

Для даного випадку $N=2^{3-1}+2\cdot 3+10= 20$ дослідів.

Кількість повторень n кожного планового експерименту з метою забезпечення потрібної достовірності та надійності експериментальних даних було прийнято рівним 10.

Для побудови регресійної моделі досліджуваної системи використовуємо квадратичне рівняння регресії з ефектами взаємодії 1-го порядку, яке має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (4.7)$$

де y – функція відгуку;

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Таблиця 4.6

Дійсні значення факторів та рівні їх варіювання

Фактори			Рівні факторів					
Назва	Од. вимір.	Позначення	-1,682	1	0	1	1,682	Інтервал варіювання
температура витримки бетонних виробів	°C	X1	63,18	70	80	90	96,82	10
відносна вологість пароповітряної суміші	%	X2	80,795	82,5	85	87,5	89,205	2,5
тривалість процесу ТВО	год.	X3	8,659	9	9,5	10	10,341	0,5

Для визначення коефіцієнтів регресії $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ використовувався метод найменших квадратів [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

$$B = Y \Phi^{-1}, \quad (4.8)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$ – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi = F^T F$ – інформаційна матриця Фішера;

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} - \text{матриця, що містить результати експериментів за}$$

матрицею планування;

$$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix} - \text{матриця, що містить значення факторів}$$

$x_{i,j}$ (де i - номер дослідів за матрицею планування, j – номер фактора);

N – кількість дослідів за матрицею планування.

Адекватність регресійної моделі перевірялася за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{vidm}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (4.9)$$

де S_{ad} – дисперсія адекватності;

S_{vidm} – дисперсія відтворюваності;

$[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера;

$f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності;

$f_2 = n - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності;

d – кількість значимих коефіцієнтів регресії;

n – кількість попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при $F \leq [F(f_1, f_2)]$ регресійну модель вважаємо адекватною.

Дисперсії відтворюваності визначалася за формулою:

$$S_{vidm}^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (4.10)$$

де y_i – результат i -го повторного дослідів;

\bar{y} - середнє арифметичне значення результатів n повторних дослідів.

Кількість повторних дослідів знаходилась за формулою [44]:

$$n \geq \frac{1 + P_{\text{дов}} + 2n_{\text{відк}}}{1 - P_{\text{дов}}}, \quad (4.11)$$

де $P_{\text{дов}}$ – довірча ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах;

$n_{\text{відк}}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно рекомендацій авторів робіт [45, 46] довірча ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при $n_{\text{відк}}=0$

$$n \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} = 9...19.$$

Дисперсія адекватності визначалася за формулою:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (4.12)$$

де y_i – результат i -го дослідів, проведеного за матрицею планування;

\tilde{y}_i – результат i -го значення дослідів, передбаченого за допомогою регресійної моделі;

Перевірка закону розподілу експериментальних значень в кожній серії повторних дослідів проводилась шляхом порівняння відношень дисперсій кожного планового дослідів до сумарної дисперсії експерименту з табличним значенням Кохрена [45, 46], при перевищенні значення якого експерименти, що відповідають неоднорідним дисперсіям, повторювались заново, а в іншому випадку гіпотеза про однорідність дисперсій приймалася.

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за t -критерієм Стьюдента:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{\text{відм}} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (4.13)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t-критерію Стюдента, яке рівне значенню розподілу Стюдента;

$c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1} .

Для функції відгуку у рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для дійсних значень після відкидання ефектів взаємодії малої значимості має вигляд:

$$y = 52,79 + 0,398x_1 + 0,398x_2 + 1,01x_3 - 0,356x_1x_2 + 0,006x_1x_3 + 0,341x_2x_3 - 0,023x_1^2 - 0,061x_2^2 - 0,566x_3^2 \quad (4.14)$$

Перевірка адекватності регресійної моделі проводилася за критерієм Фішера, який за результатами проведених дослідів склав 2,4611, що не перевищує табличного значення 2,7214. Отже, рівняння регресії (4.13) є адекватним.

За допомогою пакету прикладних програм MathCAD побудовано поверхні відгуку в площині (рис. 4.5) дійсних значень параметрів.

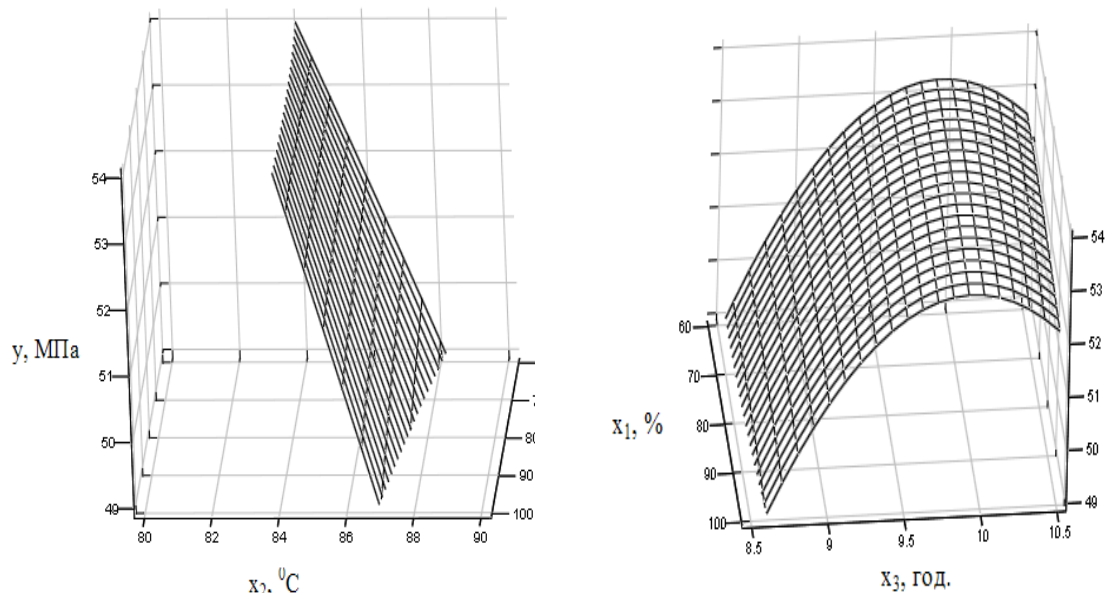


Рис. 4.5. Поверхні відгуку міцності бетонних виробів в площині дійсних значень параметрів: а) x_1 - x_2 ; б) x_1 - x_3

За допомогою пакету прикладних програм MathCAD було проведено оптимізацію значень величин міцності R_b шляхом їх максимізації. В результаті отримані наступні оптимальні значення параметрів процесу виготовлення бетону:

- для максимального значення величин міцності $R_b = 52,81$ МПа:

$$t = 80,80^{\circ}\text{C}; \varphi = 96,82\%; \tau = 9,67 \text{ год.}$$

Експерименти показали, що залежності значень величин міцності R_b залежать від наступних параметрів: температури витримки бетонних виробів t ; відносної вологості пароповітряної суміші φ ; тривалості процесу ТВО τ і носять квадратичний характер.

ВИСНОВКИ

В результаті проведення досліджень, було отримано наступні результати:

1. В результаті проведеного аналізу існуючих технологічних процесів та устаткування для тепловологісної обробки бетонних виробів, встановлено доцільність застосування запропонованого технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагріву у пропарювальній камері із дистанційно контрольованими та регульованими параметрами.

2. На основі аналізу існуючих способів тепловологісної обробки бетонних виробів та використовуваного при цьому устаткування розроблено та захищено патентами України новий технологічний процес та відповідне устаткування для тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагріву без котельні та допоміжних комунікацій на джерело пароутворення безпосередньо в пропарювальній камері. Запропоноване устаткування має спрощену конструкцію порівняно із відомими установками. Окрім того, забезпечення даної установки адаптивною системою керування надає можливість регулювання і дотримання необхідних технологічних режимів технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів.

3. Прийняті основні припущення, наведена розрахункова схема та математичне обґрунтування технологічного процесу тепловологісної обробки бетонних виробів, що базується на теоретичному аналізі робочого процесу, який проходить у пропарювальній камері.

4. Для випробування розробленої технології та устаткування була сконструйована лабораторна установка. Перед випробуванням проведено математичне планування експериментів і отримані адекватні квадратичні рівняння регресії та поверхні відгуку щодо міцності бетонних виробів, що надало можливість оптимізувати технологічний процес тепловологісної обробки бетонних виробів залежності від величини параметрів температури, вологості та часу ($t = 80,80^{\circ}\text{C}$; $\phi = 96,82\%$; $\tau = 9,67$ год.). Встановлено, що якість готової продукції відповідає вимогам встановленим у ГОСТ 5802-86, ДСТУ Б В 2.7-32-95 і ДСТУ Б В 2.7-23-95.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Будівельне матеріалознавство / [Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. та ін.] – К.: ТОВ УВПК «ЕксОб», 2004. – 704 с. – ISBN 966-7769-35-6.
2. Влияние тепловлажностной обработки на эксплуатационные свойства бетона [Электронный ресурс]: Федосов С. В, Бабанов С. М., Акулова М. В., Торопова М. В. //Изв. вузов. Строительство, 2003. – №7. С. 47 – 50 Режим доступа к журн.: <http://old.sibstrin.ru/izv2003.html>. Название с экрана. – ISBN 5-9296-0333-2
3. Малинина Л. А. Тепловлажностная обработка бетона / Малинина Л. А. – М.: Стройиздат, 1977. – 159 с.
4. Марьямов Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Марьямов Н. Б. –М.:Стройиздат, 1970. – 272 с.
5. Бутт Ю. М. Твердение вяжущих при повышенных температурах / Бутт Ю. М., Рашкович В. Н. – М.: Стройиздат, 1965. - 263с.
6. Электронная библиотека: Общие вопросы бетона [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.hydrobeton.ru>. Назва з екрану.
7. Баженов Ю. М. Технология бетона [Электронный ресурс]: [Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб.] / Баженов Ю. М. – М.: Высш. шк., 1987. - 415 с. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/65050/> Назва з екрану.
8. Баталов В. С. Структуро-механические свойства шлакопортландцемента при горячем формовании / Баталов В. С., Носова Т. П. //Применение методов – электротермии в технологии бетонных работ. – Магнитогорск – МГМИ, 1969. – С. 13 – 17.
9. Комохов П. Г. Структурная механика и теплофизика легкого бетона [Электронный ресурс]: Комохов П. Г. – Вологда: изд-во Вологодского научного центра, 1992. – 321с. Режим доступа: <http://www.allbeton.ru/article/47/13.html> Назва з екрану. ISBN 5-93093-069-4
10. Невилль А. М. Свойства бетона / Невилль А. М. – М.: Стройиздат, 1972. - 344с.

11. Kalousek G. L. The reactions of cement hydration of elevated temperatures / Kalousek G. L. //Proc. 3d Intern. Symp, Chem, Cem.-London, 1952. -P. 334-355.

12. Кравченко И. В. О структуре цементного камня при ускоренном пропаривании / Кравченко И. В., Власова М. Т. – Научное сообщение НИИЦемент № 8. – М., 1960.

13. Малинина Л. А. Физические основы твердения бетона при тепловой обработке В кн.: Тепловая обработка бетона./ Малинина Л. А., – М.: НИИЖБ, 1967. с. 17 – 32.

14. Малинина Л. А. Ускорение твердения бетона / Малинина Л. А., Миронов С. А. – М.: Стройиздат, 1964. - 347с.

15. Steln H. N. Loc mecanisme de L'hydratation du ileate tricdeigw/ Steln H. N., Stevels L. M. – Silikatesindustr, 1967. - №10 p. 32 – 34.

16. Астреева О. М. Изучение процессов гидратации цементов / Астреева О. М. - М.: Центральный институт научной информации по строительству и архитектуре АС и А СССР, 1960. - 64 с.

17. Ахнердов И. Н. Высокопрочный бетон / Ахнердов И. Н. – М.: Госстройиздат, 1963. – 128 с.

18. Миронов С. А. О структуре и прочности бетона, подвергнутого пропариванию [В кн.: Структура, прочность и деформации бетонов]/ Миронов С. А., Малинина Л. А. - М.: Стройиздат, 1966 – 366 с.

19. Шейкин А. Е. Структура прочность и трещиностойкость цементного камня / Шейкин А. Е. – М.: Стройиздат, 1974. - 191 с.

20. Крылов Б. А. Теоретические основы форсированного электроразогрева бетонной смеси и виброуплотнения ее в горячем состоянии / Крылов Б. А. //Обобщение практики зимнего бетонирования с электроразогревом смеси - Новосибирск ПИСИ, 1972. – С. 20-32

21. Шейкин А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / Шейкин А. Е., Добшиц Л. М. - Л.: Стройиздат, 1989. - 127 с.

22. Миронов С. А. Развитие методов тепловой обработки бетона в промышленности сборного железобетона [В кн.: Тепловая обработка бетона. Материалы семинара] / Миронов С. А. - М.: Стройиздат, 1967. - 143 с.

23. Книга: Строительные материалы и технологии [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://msd.com.ua/str/27.html>. Назва з екрану.

24. Швець В. В. Термосиловий вплив, як метод управління структуроутворенням при твердненні бетону / Швець В. В., Дудар І. Н. // Науковий вісник будівництва. – Харків.: ХДТУБА, 2001. – Вип. 14. – С. 140-143. ISBN 5-274- 00381-8

25. Тевис П. И. Рециркуляционные установки аэродинамического нагрева / Тевис П. И., Ананьев В. А., Шадек Е. Г. – М.: Машиностроение, 1986. – 208 с.

26. Поляков В. В. Насосы и вентиляторы / Поляков В. В., Скворцов Л. С.. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с. ISBN 5-274-01021-0

27. Сушильные камеры аэродинамические. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://aero.scron.com/paero.html>. Назва з екрану.

28. Растимешин С. А. Технические средства для местного обогрева / Растимешин С. А.. -М.: Росагропромиздат, 1990. - 78 с. - (Новое в механизации животноводства). ISBN 5-260-00359-4

29. Фокин В. М. Эксплуатация теплогенерирующих установок: Учеб. Пособие / Фокин В. М. -Волгоград, 1999. -80 с. ISBN 5-94275-196-X

30. Патент 18723. МПК B01J 3/04. Автоклавна установка тепловологісної обробки / Сліпенька О. П., Сторожук С. Б., Коц І. В. - № u 200605904; Заявлено 29.05.2006; Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.

31. Сліпенька О. П. Аналітичне дослідження автоклавних установок із аеродинамічним нагрівом / Сліпенька О. П., Коц І. В. // Вісник Хмельницького національного університету, 2006. – № 5. – С. 93 – 98.

32. Патент 6545. МПК F26B 3/06 Спосіб сушіння рослинної та іншої сировини/ Коц І. В., Скородзієвська Л. В. - № 20040907844; Заявлено 27.09.2004; Опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.

33. Патент 10712. МПК F26B 3/06 Спосіб сушіння рослинної сировини / Коц І. В., Мельник І. Г. - № 94086490; Заявлено 04.08.1996; Бюл. № 4.

34. Патент 35967. МПК F26B 3/00 Установа для сушіння сировини/ Коц І. В., Бауман К. В. - № u200805829; Заявлено 05.05.2008; Опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

35. Комиссаров А. П. Теоретические основы расчета величин нагрева воздуха в двухроторной аэродинамической камере / Комиссаров А. П., Швецов В. В, Швецова С. В. // Научный журнал

«Успехи современного естествознания», 2007 №7, [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://www.rae.ru>. Назва з екрану.

36. Колісник О. П. Термоопалубка для теплової обробки бетонних виробів / Колісник О. П. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Збірник наукових праць – Львів: Каменяр.– 2009. – Випуск 8. – С. 458 – 465. ISBN 978-966-607-099-2

37. Колісник О. П. Процеси тепломасобміну при тепловій обробці бетонних виробів / Колісник О. П. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. - №38 – С. 82 – 87.;

38. Москвіна С.М. Проблеми оптимізації управління технологічним процесом виготовлення цегли / Москвіна С.М., Ковалюк Д. О. // Вісник ХНУ, 2005. – №5. – С.121 – 125 ISBN 978-966-641-272-3

39. Внедренные и действующие АСУ технологическими процессами и энергосберегающие. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://www.uralreg.ru>. Назва з екрану.

40. Патент 2256209. МКИ G05D27/00. Устройство для автоматического управления процессом тепловой обработки бетона / Плотников Н. М., Ходикин В. В., Киргизов А. М. - № 2003130713/28; Заявлено 17.10.03; Опубл. 10.07.05

41. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976.– 167 с.

42. Автоматизація технологічного процесу тепловологісної обробки. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://zgblmk.narod.ru/automation>. Назва з екрану.

43. Колісник О. П. Математична модель тепловологісної обробки бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагріву. / Колісник О. П. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2009. - №45 – С. 16 – 20. ISBN 966-593-286-1

44. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / Зедгинидзе И. Г. – М.: Науки, 1976. – 390с.;

45. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных русловий. - 2-е изд. перераб. и доп. / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. - М.: Наука, 1976. - 280 с.
46. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / Бондарь А. Г., Статюха Г. А.. - К.: Вища школа, 1976. - 183 с.
47. Чистяков В. В. Фізико-хімічні аспекти інтенсифікації процесів гідрато- та структуроутворення мінеральних в'язучих систем: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д.т.н.: спец. 05.23.05 "Будівельні матеріали та вироби" / Чистяков В. В., КНУБА. - Київ, 1994. - 33 с.
48. Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів: Навчальний посібник / [Братчун В.І., Золотарьов В.О., Пактер М.К. та інші]; під ред. Братчуна В.І. - Макіївка: ДонНАБА, 2006. - 303 с. - ISBN 5-7763-0351-6.
49. Сліпенька О. П. Энергозбереження при автоклавному оброблені будівельних виробів / Сліпенька О. П. // Вісник ВПІ, 2007. - № 4. - С. 24-27.
50. Аксёнова Л. Л. Энергетические аспекты тепловой обработки легкобетонных изделий и конструкций / Аксёнова Л. Л., Загороднюк Л. Х., Тарасов А. С. // Сборник Международной научно-методической конференции «Экология – образование, наука и промышленность», 2002. <http://conf.bstu.ru/conf/view/?id=11>. Назва з екрану.
51. Колісник О. П. Перспективи використання автоклавної обробки будівельних виробів / Колісник О. П. // Науково-технічний збірник "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві" – 2007. - № 4. - С. 75 – 78.
52. Патент 2082701. МКИ C04B40/02, B28B11/24. Способ термовлажностной обработки, преимущественно блочных бетонных изделий / Шичков А. Н., Гительман Е. Б., Яблоко С. Б. и др. - № 5067018/03; Заявлено 4.04.92; Опубл. 27.06.97, Бюл. № 13
53. Строительство и реконструкция. [Электронный ресурс]: – Режим доступа – <http://www.stroymart.com.ua/ru/publications>. Назва з екрану.
54. Патент 2121468. МКИ C04B40/02, B28B11/24. Способ тепловлажностной обработки строительных материалов с

рекуперацией тепла и установка для его осуществления / Хаимский З. М. - № 97102075/03; Заявлено 13.02.97; Опубл. 10.11.98, Бюл. № 21.

55. Патент 2115635. МКИ C04B40/02. Способ термовлажностной обработки известково-кремнеземистых изделий автоклавного твердения / Цыро В. В.; Секержицкий М. А.; Поташников Ю. М.; Зенков В. П.; Степанов Г. Н.; Курбанов А. З.; Луцик В. И.; Чурсанов Ю. В.; Плужников А. И. - № 97108261/03; Заявлено 20.05.97; Опубл. 20.07.98, Бюл. № 14.

56. Патент 2136635. МКИ 6 C04B40/02, C04B38/08. Способ тепловой обработки полистиролбетонных изделий и конструкций / Рахманов В. А., Мелихов В. И., Девятков В. В., Козловский А. И., Шумилин В. И. - № 97102984/03; Заявлено 26.02.97; Опубл. 10.09.99, Бюл. № 17.

57. Патент 2028996. МКИ C04B40/02. Способ тепловой обработки изделий из тяжелого бетона / Дикань С. А., Коршунов М. А., Куприянов Н. Н. - № 4947604/33; Заявлено 24.06.91; Опубл. 20.02.95, Бюл. № 4.

58. Патент 2297025. МКИ G05D 27/00. Способ автоматизированного управления процессом тепловой обработки бетона в условиях открытой строительной площадки / Плотников Н. М., Киргизов А. М. - № 2005122237/28; Заявлено 2005.07.13; Опубл. 2007.04.10.

59. Патент 533649. МКИ C21D9/00. Аэродинамический нагреватель / Поклонский А. П., Карташов Н. Ф., Тюмеров А. И., Дудник А. Л. - № 2197164/02; Заявлено 30.10.73; Опубл. 04.11.76, Бюл. № 40.

60. Патент 487290. МКИ F27D7/00. Аэродинамический нагреватель / Дудник А. Л., Поклонский А. П., Тюмеров А. И. - № 1978953/22-1; Заявлено 20.12.73; Опубл. 05.10.76, Бюл. № 37.

61. Патент 309133. МКИ C21D9/00. Рециркуляционная нагревательная установка / Тевис П. И., Ананьев В. А., Крюков В. М., Митин Д. М., Печеркин А. Г., Тимошенко С. К., Зырянов И. К., Павлютенков В. М. - № 1380728/22-3; Заявлено 15.09.68; Опубл. 09.07.71, Бюл. № 40.

62. Патент 40453. МПК C04B 40/00 Пропарювальна камера / Колісник О. П., Коц І. В. - № u200812905; Заявлено 05.11.2008; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.

63. Патент 40455. МПК С04В 40/00 Спосіб тепловологісної обробки будівельних виробів/ Колісник О. П., Коц І. В. - № u200812911; Заявлено 05.11.2008; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.

64. Патент 45422. МПК С04В 40/02 Спосіб виготовлення бетонних опор для садових та виноградних шпалер/ Дикий В. В., Колісник О. П., Коц І. В. Сторожук С. Б. - № u200905576; Заявлено 01.06.2009; Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.

65. Романюк В. Н. Основы эффективного энергоиспользования на производственных предприятиях дорожной отрасли / Романюк В. Н., Радкевич В. Н., Ковалев Я. Н. // Минск, 2001. – 287с.

66. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / Бродянский В. М., Фратшер В. К., Михалек К. П. // - М.: Энергоатомиздат, 1998.-288 с.-ISBN 5-283-00152-0.

67. Колісник О. П. Енергозбереження при тепловологісній обробці бетонних виробів / Колісник О. П. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць - 2009. - №33 - С. 225 - 227.

68. Сліпенька О. П. Енергозбереження при автоклавному обробленні будівельних виробів / Сліпенька О. П. // Вісник ВПІ - 2007. - № 4. - С. 24-27.

69. Чепурний М. М. Основы технічної термодинаміки: Підручник / Чепурний М. М., Ткаченко С. Й.// - Вінниця: Поділля – 2000, 2004. – 352с.

Наукове видання

Коц Іван Васильович
Колісник Олена Петрівна

РЕДАКТОР С. МАЛІШЕВСЬКА

ОРИГІНАЛ-МАКЕТ ПІДГОТОВЛЕНО КОЛІСНИК О. П.

Вінницький національний технічний університет
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2013р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009р.